

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

CARACTERIZACIÓN ANATÓMICA DE *Eucalyptus smithii* R. T. Baker

por

Marcia Andrehína BRAGA GONZÁLEZ

TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2022

Tesis aprobada por:

Director:

-----  
Dra. Ing. Forestal Ana Paula Coelho

-----  
Dra. Ing. Química Marcela Ibáñez

-----  
Ing. Agr. Sebastián Quagliotti

Fecha: 16 de setiembre de 2022

Autora:

-----  
Marcia Andrehína Braga González

## AGRADECIMIENTOS

A las directoras de tesis Dra. Ing. Forestal Ana Paula Coelho y Dra. Ing. Química Marcela Ibáñez por la guía y el apoyo brindado en cada etapa de este trabajo.

Al Lic. en Bioquímica Álvaro Camargo y a los Ing. Agr. Agustín Rava, Andrés Baietto y Sebastián Quagliotti por haber cooperado en el transcurso de la tesis.

Al Centro Universitario de Tacuarembó (CUT) por facilitarme el equipamiento y las instalaciones para la etapa de laboratorio.

A familiares y amigos por acompañarme en este proceso de formación y por el apoyo brindado durante toda la carrera.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
1.1 <u>OBJETIVOS</u> .....	1
1.1.1 <u>Objetivo general</u> .....	1
1.1.2 <u>Objetivos específicos</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	2
2.1 <u>GENERALIDADES DE LA ESPECIE</u> .....	2
2.2 <u>DENSIDAD APARENTE</u> .....	3
2.2.1 <u>Generalidades y determinación</u> .....	3
2.2.2 <u>Variación de la densidad aparente</u> .....	4
2.2.2.1 <u>Variación inter-específica</u> .....	4
2.2.2.2 <u>Variación intra-específica</u> .....	6
2.2.2.3 <u>Variación individual</u> .....	7
2.2.3 <u>Influencia de la anatomía en la densidad de la madera en <i>Eucalyptus</i></u> .....	8
2.3 <u>CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS</u> .....	8
2.3.1 <u>Descripción anatómica del género <i>Eucalyptus</i></u> .....	8
2.3.1.1 <u>Elementos vasculares</u> .....	9
2.3.1.2 <u>Parénquima axial</u> .....	10
2.3.1.3 <u>Parénquima radial</u> .....	10
2.3.1.4 <u>Fibras</u> .....	12
2.3.1.5 <u>Otros</u> .....	13
2.3.2 <u>Variación de la anatomía en el árbol</u> .....	13
2.3.3 <u>Coefficientes del potencial de uso de la especie</u> .....	15
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	18
3.1 <u>ETAPA DE CAMPO</u> .....	18
3.1.1 <u>Descripción del sitio muestreado</u> .....	18
3.1.2 <u>Selección de árboles</u> .....	18
3.1.3 <u>Obtención de discos</u> .....	18
3.2 <u>ETAPA DE LABORATORIO</u> .....	19
3.2.1 <u>Obtención de probetas</u> .....	19
3.2.2 <u>Materiales y procedimiento para el cálculo de la DApB</u> .....	20
3.2.3 <u>Materiales y procedimiento para el estudio anatómico</u> .....	21
3.2.3.1 <u>Confección de preparados histológicos</u> .....	21
3.2.3.2 <u>Confección de macerados</u> .....	22
3.3 <u>CARACTERÍSTICAS MEDIDAS</u> .....	23

3.3.1 <u>Características medidas sobre corte transversal</u> .....	23
3.3.2 <u>Características medidas sobre corte longitudinal tangencial</u> .....	24
3.3.3 <u>Características medidas sobre macerados</u> .....	24
3.4 RELACIONES ENTRE DIMENSIONES FUNDAMENTALES DE LAS FIBRAS .....	24
3.5 ANÁLISIS DE DATOS .....	24
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	26
4.1 DENSIDAD APARENTE BÁSICA .....	26
4.2 CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS .....	29
4.2.1 <u>Elementos vasculares</u> .....	29
4.2.1.1 Resultados generales .....	29
4.2.1.2 Resultados en función de la altura y la posición radial .....	31
4.2.2 <u>Parénquima axial y radial</u> .....	33
4.2.3 <u>Fibras</u> .....	36
4.2.3.1 Resultados generales .....	36
4.2.3.2 Resultados en función de la altura y la posición radial .....	37
4.3 COEFICIENTES DEL POTENCIAL DE USO PARA CELULOSA Y PAPEL ..	41
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	43
6. <u>RESUMEN</u> .....	44
7. <u>SUMMARY</u> .....	45
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	46
9. <u>ANEXOS</u> .....	51

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Densidad aparente básica promedio ( $\text{g/cm}^3$ ) para diferentes especies de <i>Eucalyptus</i> cultivadas en Uruguay y Sur de Chile.....	6
2. Valores promedios y rangos para caracteres evaluados de los vasos en algunas especies de <i>Eucalyptus</i> .....	10
3. Valores promedios y rangos para caracteres evaluados de los radios parenquimáticos en algunas especies de <i>Eucalyptus</i> .....	12
4. Valores promedios y rangos para caracteres evaluados de las fibras libriformes en algunas especies de <i>Eucalyptus</i> .....	13
5. Indicadores del potencial de uso para celulosa y papel de algunas especies de <i>Eucalyptus</i> .....	16
6. Resultados estadísticos para las características vasculares.....	30
7. Resultados estadísticos para las características de las fibras.....	36
8. Resultados estadísticos para las características de las fibras según la posición radial.....	39
9. Coeficientes del potencial de uso de <i>E. smithii</i> para producción de celulosa y papel.....	41
 Figura No.	
1. Distribución natural de la especie <i>E. smithii</i> .....	2
2. Obtención de los discos y delimitación de las probetas.....	20
3. Densidad aparente básica ( $\text{g/cm}^3$ ) según la altura.....	27
4. Densidad aparente básica ( $\text{g/cm}^3$ ) según la posición radial.....	28
5. Poros visibles en corte transversal de un preparado histológico (4x).....	29

6. Elementos del vaso vistos en preparado macerado (10x).....	30
7. Diámetro tangencial del lumen del vaso ( $\mu\text{m}$ ) según la posición radial.....	32
8. Longitud del elemento del vaso ( $\mu\text{m}$ ) según la posición radial.....	33
9. Radios débilmente heterogéneos vistos en corte radial (10x).....	34
10. Radios uniseriados vistos en corte tangencial (10x).....	35
11. Fibra libriforme vista en preparado macerado (4x).....	37
12. Espesor de la pared de las fibras ( $\mu\text{m}$ ) según la posición radial.....	38
13. Longitud total de las fibras ( $\mu\text{m}$ ) según la posición radial.....	40
14. Longitud total de las fibras ( $\mu\text{m}$ ) según la altura.....	41

## 1. INTRODUCCIÓN

La superficie efectiva destinada al uso forestal en Uruguay es de 1.087.109 hectáreas, representando el 6 % del territorio nacional; *Eucalyptus* es el género predominante constituyendo el 99 % de los bosques, siendo *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, *Eucalyptus saligna* Smith y *Eucalyptus dunnii* Maiden las especies dominantes (MGAP. DGF, 2021). Si bien no se cuenta con información de la superficie efectiva correspondiente exclusivamente a *Eucalyptus smithii* R. T. Baker, se lo incluye en una categoría junto a *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage ocupando 23.356 hectáreas, lo que representa un 2 % del total de las plantaciones (MGAP. DGF, 2021).

En el año 2021 la extracción de madera para pulpa (rolliza y chips) se estimó en 10.893 m<sup>3</sup>, siendo en su totalidad del género *Eucalyptus*, lo cual representó el 60 % de la extracción de madera en rollo para el año mencionado (MGAP. DGF, 2022).

Dentro del género, *Eucalyptus globulus* Labillardière ssp. *globulus* es la especie elegida por los mercados internacionales para la producción de papel de impresión dada la calidad de sus fibras, pero en el año 2007 se detectó a *Teratosphaeria nubilosa* en el país, un hongo que ataca sus hojas juveniles y afecta el crecimiento; como alternativa se comenzó a plantar *E. smithii* en el Sudeste donde logra excelentes crecimientos, no es atacada por el hongo y posee buenas características para la producción de papel de alta calidad (Paseyro, 2015). Debido a esto, se hace relevante el estudio de la densidad y de las características anatómicas de la madera de *E. smithii*, principalmente en lo que refiere a las fibras, ya que a través de sus dimensiones se pueden calcular ciertos indicadores que son de importancia en la producción de celulosa para papel.

### 1.1 OBJETIVOS

#### 1.1.1 Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es evaluar las características anatómicas y densidad de la madera de *E. smithii* y relacionarlas con las propiedades de pulpa y papel deseables.

#### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) analizar las características anatómicas de la madera de *E. smithii*;
- b) determinar la densidad de la madera;
- c) calcular índices relacionados a la calidad de pulpa de celulosa y papel.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 GENERALIDADES DE LA ESPECIE

El género *Eucalyptus* cuenta con unos 600 taxones, con su centro de origen en Australia e islas vecinas, siendo *E. smithii* una especie arbórea originaria del Sudeste australiano (Brussa, 1994, Figura No. 1). De acuerdo con Boland et al. (2006), esta zona se encuentra entre los 50 y 1150 metros de altitud, con temperaturas del mes más cálido entre 21 y 27 °C, y del mes más frío desde -2 a 6 °C; la incidencia de heladas en la región es de baja a alta, ocurriendo incluso más de 100 heladas al año en ciertas zonas, y con lluvias anuales de 700 a 1350 mm, distribuidas mayoritariamente de manera uniforme a lo largo del año. De acuerdo con los mismos autores, esta especie se encuentra en laderas bajas de colinas y en planicies próximas a arroyos, con preferencia a suelos franco arcillosos o franco arenosos profundos, aunque crece en una amplia gama de suelos moderadamente fértiles.

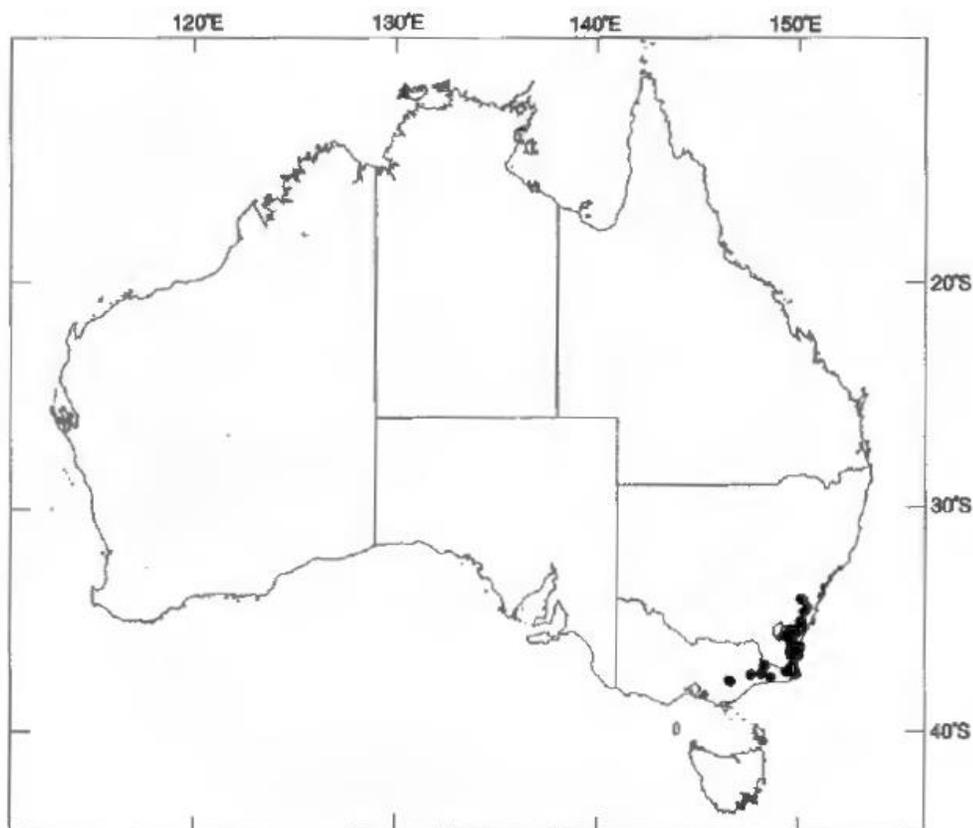


Figura No. 1. Distribución natural de la especie *E. smithii*

Fuente: tomada de Boland et al. (2006).

*E. smithii* llegó a Uruguay a comienzos del siglo XX por medio de Antonio Lussich y se difundió su cultivo en pequeña escala (Brussa, 1994). En ensayos realizados en la Estación Experimental de Bañado de Medina, Cerro Largo, mostró una gran resistencia a las heladas frente a otras especies del mismo género (Krall, 1970). Según González Vilche (2017), la especie presenta una buena tasa de crecimiento en los suelos de tipo 2 del Sur del país, superior a la especie precedente *E. globulus*.

De acuerdo con Boland et al. (2006), se trata de un árbol alto que puede alcanzar 40 a 45 metros de altura y 1 a 1,5 metros de diámetro a la altura del pecho (DAP), con un tronco largo y bien formado creciendo en sitios óptimos; sin embargo, en sitios marginales puede presentar un tronco corto y ramificado de 10 a 20 metros de altura. Brussa (1994) señala algunas características distintivas de la especie: es de gran porte, con corteza persistente y dura hasta la salida de ramas primarias, de coloración castaño oscura, caduca en largas fajas en ramas, por lo que de la parte superior del tronco se desprenden restos de corteza colgante; el follaje es aromático, con hojas juveniles opuestas, sésiles, lanceoladas, verdes y discoloras; las hojas adultas en cambio, son alternas, pecioladas, lanceoladas a angostamente lanceoladas, verdes y concoloras.

Presenta madera con duramen duro y moderadamente durable; apta para construcción, energía y producción de celulosa (Brussa 1994, Boland et al. 2006). Respecto a las características organolépticas, presenta duramen y albura de color ligeramente diferente, con albura rosada y duramen variando de rosado hasta amarillento; madera opaca, de grano irregular, textura media, olor y gusto indistinto, bolsas de quino presentes y anillos de crecimiento distintos (Fabrowski et al., 2003).

## 2.2 DENSIDAD APARENTE

### 2.2.1 Generalidades y determinación

La densidad o también llamada peso específico, expresa la relación existente entre la masa y su volumen; se trata de una de las principales propiedades de la madera porque influye sobre otras propiedades físicas y mecánicas (Coronel, 1994).

Dado que la madera es un material poroso, se debe distinguir entre densidad real y densidad aparente, en que la primera corresponde a la relación entre la masa del material leñoso y el volumen ocupado por el mismo, descontando los poros, mientras que la segunda es la relación entre la masa y el volumen de una muestra de madera, incluyendo sus espacios porosos (Coronel, 1994). Se expresan en gramos por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ ) o en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ , Tsoumis, 1991). La densidad real no tiene grandes variaciones para distintas especies, tomando valores entre 1,53 y 1,56  $\text{g/cm}^3$ ; sin embargo, la densidad aparente presenta variaciones significativas, desde 0,1 hasta 1,4  $\text{g/cm}^3$ ; esto es porque depende de la estructura de la madera y de su

contenido de humedad, por lo que se debe indicar la humedad de la misma a la que se determinó la densidad (Coronel, 1994).

Tuset y Durán (2008) destacan que se puede calcular distintas densidades según el contenido de humedad al que se determina la masa y el volumen: densidad aparente anhidra, densidad aparente básica, densidad aparente corriente y densidad aparente verde. Según los mismos autores, la densidad aparente básica (DAPB) se obtiene mediante la relación entre el peso anhidro (Pa) y el volumen verde (Vv) de la muestra:  $DAPB \text{ (g/cm}^3\text{)} = Pa/Vv$ .

De acuerdo con Coronel (1994), el peso anhidro de la madera es reproducible en laboratorio con secado en estufa, sin embargo se hace difícil determinar con exactitud el volumen al 0 % del contenido de humedad, ya que la madera absorbe humedad del medio ambiente una vez fuera de la estufa alterando su peso y volumen, por lo que cuando se requieren resultados de alta exactitud y reproducibles se emplea la DAPB.

La DAPB es de interés en la fabricación de pulpa y papel, ya que dentro de un rango óptimo de 400-600 kg/m<sup>3</sup>, la madera más densa mejora la productividad, dado que con un mismo rendimiento de pulpa, una mayor densidad indica más peso de pulpa producida por unidad de tiempo (Downes et al., 1997).

### 2.2.2 Variación de la densidad aparente

Para Downes et al. (1997), la variación de la densidad aparente de la madera se explica por múltiples factores como la tasa de crecimiento, el clima, la silvicultura, la genética, y también existe variación dentro de un mismo árbol, tendiendo a aumentar desde el centro hacia la corteza y desde la base hacia la copa, en la mayoría de los casos. Según los mismos autores, dicha variación se explica por la variabilidad de los componentes de la madera como el tamaño y la frecuencia de vasos, dimensiones de las fibras, porcentaje de parénquima y su composición química.

#### 2.2.2.1 Variación inter-específica

De acuerdo con Coronel (1994), cada especie vegetal tiene una densidad característica. En busca de alternativas para la producción de pulpa de celulosa, Doldán et al. (2008) estudiaron plantaciones comerciales uruguayas del género *Eucalyptus*, a través de la evaluación de diferentes propiedades de la madera, entre ellas, la DAPB; encontraron diferencias notorias entre especies, siendo *Eucalyptus globulus* Labillardière ssp. *maidenii* (F. Mueller) Kirkpatrick el que presentó el valor promedio más alto (Cuadro No. 1).

Con el fin de contribuir al conocimiento de la madera de *Eucalyptus tereticornis* Smith en Uruguay, Cardoso et al. (2013) evaluaron árboles de una cortina ubicados en Durazno, reportando una DApB promedio de 0,630 g/cm<sup>3</sup> (Cuadro No. 1).

En un estudio comparativo de diferentes especies del mismo género, provenientes del Sur de Chile, Carrillo-Varela et al. (2018) calcularon la DApB y concluyeron que *E. globulus* y *E. smithii* fueron las de mayor densidad con relación a las demás especies evaluadas (Cuadro No. 1). Del mismo modo, Clarke et al., citados por Fabrowski et al. (2003), en una investigación de la madera de nueve especies en localidades de Sudáfrica con heladas invernales, encontraron que *E. smithii* presentó densidades superiores a *E. saligna*, *E. grandis*, *E. dunnii*, *Eucalyptus macarthurii* Deane et Maiden, *Eucalyptus nitens* (Deane et Maiden) Maiden, *Eucalyptus fastigata* Deane et Maiden, *Eucalyptus fraxinoides* H. Deane & Maiden y *Eucalyptus oreades* R. T. Baker, con valores de 0,525 g/cm<sup>3</sup> a 0,570 g/cm<sup>3</sup>.

A continuación, en el Cuadro No. 1 se resume información sobre la DApB de la madera para distintas especies del género *Eucalyptus* utilizadas en Uruguay, según distintos autores.

Cuadro No. 1. Densidad aparente básica promedio ( $\text{g/cm}^3$ ) para diferentes especies de *Eucalyptus* cultivadas en Uruguay y Sur de Chile

Autor	Doldán et al. (2008)	Mantero et al. (2008)	Mendoza y Rava (2009)	Cardoso et al. (2013)	Carrillo-Varela et al. (2018)
Edad (años)	8-10	5	8	50	6
<i>E. grandis</i>	0,423		0,436		
<i>E. dunnii</i>	0,499	0,4			0,438
<i>E. globulus</i>	0,520		0,519		0,481
<i>E. maidenii</i>	0,559				
<i>E. badjensis</i>		0,39			0,420
<i>E. smithii</i>					0,484
<i>E. tereticornis</i>				0,630	

Fuente: elaborado en base a Doldán et al. (2008), Mantero et al. (2008), Mendoza y Rava (2009), Cardoso et al. (2013), Carrillo-Varela et al. (2018).

#### 2.2.2.2 Variación intra-específica

Según Downes et al. (1997), existe entre árboles cierta variación en la densidad de la madera, lo cual es resultado de causas ambientales y genotípicas, como el sitio, espaciamiento, silvicultura, procedencia, familia y la tasa de crecimiento como resultado de la interacción genotipo por ambiente.

Igartúa y Monteoliva (2010) encontraron diferencias significativas para la DApB entre dos procedencias de *E. globulus*, evaluada en árboles de siete años de edad, plantados en Buenos Aires, Argentina, con similares densidades y métodos de plantación; concluyeron que las diferencias halladas podrían explicarse por causas genéticas dado que ambas procedencias eran coetáneas, plantadas en un mismo sitio y con tratamientos silvícolas semejantes. En contraparte, Moreno e Igartúa (2015) no encontraron diferencias significativas en la DApB entre distintas procedencias, y tampoco entre edades para la misma especie plantada en el Sudeste de Buenos Aires, Argentina, con un rango de edad entre diez y dieciséis años; sin embargo, observaron un valor medio mayor de densidad en las masas forestales de trece a dieciséis años respecto a las de diez y once años. Por otro lado, los mismos autores encontraron diferencias significativas según la aptitud de los suelos, en que las mayores densidades correspondieron a suelos poco a no aptos. Para la especie *E. smithii* no se encontraron estudios similares.

### 2.2.2.3 Variación individual

Con respecto a la variación longitudinal de la DApB de la madera en plantaciones de diferentes especies de eucalipto, la mayoría de las investigaciones indican que ésta aumenta en sentido apical en el árbol, a veces acompañada de una disminución inicial en la base; no obstante, se pueden describir 4 patrones generales observados en dichos resultados: 1- densidad creciente con la altura, 2- densidad decreciente con la altura, 3- disminución inicial seguida de aumento, o 4- sin cambios (Downes et al., 1997).

Mantero et al. (2008) evaluaron la variación de la densidad a lo largo del fuste en *E. dunnii* de cinco años de edad ubicado en Tacuarembó, Uruguay, y concluyeron que hubo una disminución desde la base hasta la porción media del fuste comercial, para luego aumentar en la porción apical. *E. dunnii* y *Eucalyptus badjensis* Beuzev. & Welch de ocho años aproximadamente plantados en Tacuarembó, mostraron un comportamiento ambiguo de la DApB en relación a la altura, dado que en la mayoría de los árboles aumentó hacia el ápice y en otros se mantuvo constante a lo largo del fuste (Fernández y Ros, 2002).

Igartúa y Monteoliva (2010) encontraron diferencias significativas entre distintas alturas del fuste para una de las procedencias evaluadas de *E. globulus* en Buenos Aires, Argentina, en que la densidad aumentó en sentido base-ápice a partir del 30 % de la altura total (alrededor de los 4 metros); sin embargo, la otra procedencia estudiada no mostró cambios significativos a lo largo del fuste. Los resultados de dichos autores coinciden con Cardoso et al. (2013) que, trabajando con la madera de *E. tereticornis* de cincuenta años de edad en Durazno, Uruguay, concluyeron que no hubo diferencias entre las dos alturas evaluadas. Resultados similares encontraron Bocage y Ulery (2005), que no observaron variaciones importantes a lo largo del fuste en *E. benthamii* de seis años en Tacuarembó.

En cuanto a la variación radial de la densidad de la madera en el género *Eucalyptus*, si bien algunos autores han informado aumento con una disminución inicial próxima a la médula, el patrón general observado ha sido que crece a medida que se aleja de ésta (Downes et al., 1997). En este sentido, Cardoso et al. (2013) reportaron mayor DApB en posiciones más próximas a la corteza en dos alturas analizadas en *E. tereticornis* de cincuenta años en Durazno, Uruguay.

En árboles de una plantación de *Eucalyptus regnans* F. Muell de dieciséis años en Chile, Omonte y Valenzuela (2011) encontraron tres patrones de variación radial para la DApB a lo largo del fuste: el primero se observó a la altura del tocón, donde la densidad disminuyó levemente desde la médula (0,403 g/cm<sup>3</sup>) hasta aproximadamente el 15 % del radio (0,390 g/cm<sup>3</sup>), para luego aumentar fuertemente hacia la periferia (0,457 g/cm<sup>3</sup>); el segundo patrón se encontró entre el 10 y el 50 % de la altura total del árbol,

donde la densidad tuvo una fuerte caída desde la médula (0,497 g/cm<sup>3</sup>) hasta aproximadamente el 40 - 60 % del radio (0,414 g/cm<sup>3</sup>), incrementándose, luego, levemente hacia la periferia (0,436 g/cm<sup>3</sup>); finalmente, el tercer patrón radial se presentó en el 60 y 70 % de la altura del árbol, donde la densidad mostró una fuerte caída de médula a corteza (de 0,516 a 0,452 g/cm<sup>3</sup> aproximadamente).

Respecto a la especie de interés en este trabajo, no se hallaron estudios que analizaran la variación individual de la densidad en la madera.

### 2.2.3 Influencia de la anatomía en la densidad de la madera en *Eucalyptus*

Williams y León (2010) investigaron cómo influye la anatomía de la madera sobre su densidad, para poder tener una mejor perspectiva del comportamiento de la misma en su transformación y uso final. En el caso de las latifoliadas, los mismos autores sostienen que presentan mayor heterogeneidad celular en relación a las coníferas, lo que hace más complicado establecer relaciones entre anatomía y densidad; no obstante, existe una influencia en conjunto de los elementos celulares: el aumento en el grosor de las paredes y volumen de las fibras produce aumentos en dicha propiedad; aumento en el diámetro de los poros y/o en la frecuencia de vasos, reduce sus valores; también el aumento en la proporción de tejido parenquimático podría generar un efecto de reducción en la densidad al tratarse de células con paredes delgadas. En este sentido, Tsoumis (1991) define que la madera tardía, al estar formada por células de paredes más gruesas y lúmenes más pequeños, comparado a la madera temprana, posee mayor densidad. Asimismo, una alta proporción de tejido vascular reduce la densidad de la madera al ocupar volumen que podría estar ocupado por fibras, además su presencia no es deseable en la pulpa para papeles de impresión, ya que los vasos se adhieren poco en la superficie de las hojas y tienden a “arrancarse” durante la impresión, afectando la calidad (Colley, citado por Downes et al., 1997).

## 2.3 CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS

### 2.3.1 Descripción anatómica del género *Eucalyptus*

Investigaciones en distintas especies de eucaliptos coinciden en algunas características anatómicas de la madera: la porosidad es difusa, los poros son predominantemente solitarios y en algunos casos múltiples cortos, con orientación diagonal; vasos con placas de perforación simples, con tílides presente; radios uniseriados hasta triseriados, predominando los primeros; parénquima axial paratraqueal (de escaso hasta vasicéntrico) y/o apotraqueal difuso; presencia de traqueidas vasicéntricas; predominio de fibras libriformes no septadas, en algunos casos también presencia de fibrotraqueidas (Dadswell 1972, Villegas y Rivera 2002, Fabrowski et al. 2003, Bocage y Ulery 2005, Mantero et al. 2008, Mendoza y Rava 2009, Pirralho et al. 2014).

### 2.3.1.1 Elementos vasculares

Las latifoliadas se caracterizan por ser las únicas en presentar estructuras celulares conocidas como vasos leñosos, que consisten en un conjunto axial de células que forman un arreglo en forma de tubo de largo variable, denominadas elementos de los vasos, y cuya función es la conducción ascendente de savia; en sección transversal, los vasos se nombran como poros (Tuset y Durán, 2008).

Dadswell (1972) encontró las siguientes características en la mayoría de las especies estudiadas pertenecientes al género *Eucalyptus*: elementos del vaso con longitudes de 0,28 a 0,67 mm; poros distribuidos de forma uniforme, desde muy pequeños, invisibles sin lentes de 10x, hasta grandes y visibles a simple vista; número de poros por mm<sup>2</sup> dentro del rango de 5 a 11, aunque algunas especies lo exceden; diámetros tangenciales máximos de los vasos entre 64 y 245 µm.

Villegas y Rivera (2002) observaron que el diámetro tangencial medio de los vasos fue de 88 a 110 µm, y el diámetro tangencial máximo de 128 a 162 µm; la porosidad es difusa, con vasos en disposición diagonal, de contorno oval y los más pequeños circulares, solitarios, a veces múltiples cortos y de 6 a 14 poros/mm<sup>2</sup>; los elementos de vaso midieron desde 265 a 407 µm de longitud promedio, algunos presentaron apéndices, puntuaciones inter-vasculares areoladas y alternas para ocho especies estudiadas del género –*E. grandis*, *E. saligna*, *E. dunnii*, *E. globulus*, *E. maidenii*, *E. tereticornis*, *Eucalyptus camaldulensis* Dehnhardt y *Eucalyptus viminalis* Labillardière- (Cuadro No. 2).

En *E. smithii* los poros son visibles a simple vista, de sección ovalada a circular, en disposición diagonal, poco frecuentes y en su mayoría solitarios, a veces de a dos; la porosidad es difusa, con presencia de tálides obstruyendo los poros; elementos vasculares de cortos a medianos, con o sin apéndices en un extremo o en ambos, diámetro tangencial pequeño a mediano, con placas de perforación simples, puntuaciones inter-vasculares areoladas, alternas, ovaladas a circulares (Fabrowski et al., 2003).

Cuadro No. 2. Valores promedios y rangos para caracteres evaluados de los vasos en algunas especies de *Eucalyptus*

Especie	Vasos					
	Diámetro tangencial (µm)		Longitud del elemento del vaso (µm)		No. de poros/mm <sup>2</sup>	
	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media
<i>E. smithii</i>	70-180	126	230-550	373	5-10	8
<i>E. saligna</i>	25-208	104	125-650	407	4-10	6
<i>E. maidenii</i>	17-192	102	200-530	352	4-19	9
<i>E. dunnii</i>	53,2-172,9	103,5	93,3-506,5	278,9	3-14	8
<i>E. benthamii</i>	15-150	71,2	50-460	216,9	1-28	8,72
<i>E. globulus</i>	20-155	80,5	112-583	260,47	4-36	10,76
<i>E. grandis</i>	16-193	104,4	112-627	314,58	3-29	9,95

Fuente: elaborado en base a Villegas y Rivera (2002), Fabrowski et al. (2003), Bocage y Ulery (2005), Mantero et al. (2008), Mendoza y Rava (2009).

### 2.3.1.2 Parénquima axial

Se trata de un tejido formado por células longitudinales de pared delgada y lumen amplio, cuya función es la de almacenar sustancias de reserva (Tuset y Durán, 2008). Según su posición respecto a los vasos, puede ser paratraqueal cuando se ubica adyacente a los mismos, o apotraqueal cuando no está en contacto con los vasos (Tsoumis, 1991). En el género *Eucalyptus* se reporta parénquima de los dos tipos, el primero varía de unas pocas células en contacto con los vasos hasta abundantemente vasicéntrico, y el segundo es raro en muchas especies, pero en otras es abundantemente difuso (Dadswell, 1972).

Otras investigaciones reportaron parénquima desde escaso en *E. grandis* y *E. saligna*, hasta abundante en *E. camaldulensis* y *E. globulus*, con presencia del tipo paratraqueal en *E. smithii* y *E. benthamii*, y de ambos tipos en otras especies como *E. grandis*, *E. saligna*, *E. globulus*, *E. maidenii* y *E. dunnii*; el paratraqueal se presentó vasicéntrico en *E. smithii*, mientras que en las demás especies se reportó vasicéntrico, unilateral y confluyente; y el apotraqueal difuso y difuso en agregados (Villegas y Rivera 2002, Fabrowski et al. 2003, Bocage y Ulery 2005, Mendoza y Rava 2009).

### 2.3.1.3 Parénquima radial

Los radios leñosos son células de parénquima horizontales, en general formando varias hileras que pueden verse a ojo desnudo (Tuset y Durán, 2008). Cuando esas células parenquimáticas son todas de igual forma (alargadas radialmente, llamadas

procumbentes, cuadradas o erectas) los radios se denominan homogéneos, en cambio cuando presentan algunas filas de células cuadradas o erectas, además de las procumbentes, se denominan heterocelulares o heterogéneos; además, los radios pueden presentar una sola célula de ancho en sección tangencial llamándose uniseriados, o ser biseriados, multiseriados o agregados (Tsoumis, 1991).

Dadswell (1972) observó en el género *Eucalyptus* que el número de radios fue de 7 a 16 por mm lineal en sección transversal; adicionalmente, en sección tangencial encontró uniseriados a triseriados, o hasta 4 células de ancho, débilmente heterocelulares, con una a varias filas de células procumbentes marginales de mayores dimensiones verticales que las células centrales. Villegas y Rivera (2002) encontraron un porcentaje de radios uniseriados entre un 45 y 97 %, biseriados entre 3 y 54 %, y de 0 a 14 % triseriados; la altura promedio de 8 a 13 células, con contenidos presentes, y de 11,5 a 15 radios por mm lineal para las especies *E. grandis*, *E. saligna*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. maidenii*, *E. viminalis* y *E. dunnii* (Cuadro No. 3).

Para *E. dunnii* describieron a los radios en su mayoría como heterogéneos y biseriados; en cambio, en *E. benthamii*, *E. globulus* y *E. grandis* se observaron homogéneos uniseriados, a veces biseriados (Bocage y Ulery 2005, Mantero et al. 2008, Mendoza y Rava 2009).

En *E. smithii*, Fabrowski et al. (2003) encontraron radios indistintos a simple vista, homogéneos, formados por células procumbentes, uniseriados predominantes y biseriados localmente presentes, los primeros muy finos (8-10  $\mu\text{m}$ ); también observaron radios bajos a medianos, numerosos a muy numerosos, con contenido presente en algunos, y puntuaciones radio-vasculares simples, ovaladas a redondeadas.

Cuadro No. 3. Valores promedios y rangos para caracteres evaluados de los radios parenquimáticos en algunas especies de *Eucalyptus*

Especie	Radios					
	Altura de radios ( $\mu\text{m}$ )		Altura de radios (No. de células)		No. de radios/mm lineal	
	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media
<i>E. smithii</i>	38-300	155	2-17	9	7-14	10
<i>E. saligna</i>			1-54	13	11-20	15
<i>E. maidenii</i>			1-46	10	9-14	12
<i>E. dunnii</i>	66,5-824,6	295,4	3-43	14		
<i>E. benthamii</i>	25-525	157	2-35	9,5		
<i>E. globulus</i>	76-559	190,38	4-33	10,1	8-23	13,6
<i>E. grandis</i>	77-446	228,18	3-28	10,7	6-18	12,6

Fuente: elaborado en base a Villegas y Rivera (2002), Fabrowski et al. (2003), Bocage y Ulery (2005), Mantero et al. (2008), Mendoza y Rava (2009).

#### 2.3.1.4 Fibras

Las fibras son el tipo celular que predomina en latifoliadas, rodean los vasos, tienen forma alargada, paredes gruesas y tienen función de sostén, influyendo en propiedades de resistencia mecánica de la madera (Tuset y Durán, 2008). Pueden presentar puntuaciones simples a areoladas pequeñas, generalmente en fibras libriformes, o puntuaciones claramente areoladas en las fibrotraqueidas (IAWA, 1989). En general, las primeras son de menor diámetro y longitud (Tsoumis, 1997).

En este sentido, Villegas y Rivera (2002) describieron dos tipos de fibras para *Eucalyptus* spp., unas con puntuaciones simples y minúsculas, y otras con puntuaciones areoladas; sus longitudes varían de 768-1292,5  $\mu\text{m}$  y de 674-1109  $\mu\text{m}$ , respectivamente, de contorno angular y/o circular (Cuadro No. 4). Dadswell (1972) encontró fibrotraqueidas no septadas, generalmente de paredes medianas a gruesas, ocasionalmente de paredes delgadas, con longitud en madera madura de 0,75 a 1,36 mm, y diámetros de 12 a 21  $\mu\text{m}$  en diversas especies de eucalipto.

*E. benthamii*, *E. dunnii*, *E. globulus* y *E. grandis* mostraron fibras libriformes, no septadas y de extremos ahusados; en *E. benthamii* y *E. globulus* se observaron fibras muy cortas a cortas; en *E. maidenii* y *E. saligna*, además de fibras libriformes, fueron observadas fibrotraqueidas (Villegas y Rivera 2002, Bocage y Ulery 2005, Mantero et al. 2008, Mendoza y Rava 2009).

*E. smithii* está compuesto por fibras libriformes, no septadas, con puntuaciones simples; son cortas a medianas y estrechas (8-15  $\mu\text{m}$ ); cuando las capas de crecimiento son distintas, están delimitadas por zonas fibrosas, caracterizadas por un mayor engrosamiento de las fibras (Fabrowski et al., 2003).

Cuadro No. 4. Valores promedios y rangos para caracteres evaluados de las fibras libriformes en algunas especies de *Eucalyptus*

Especie	Fibras					
	Longitud de las fibras ( $\mu\text{m}$ )		Espesor de la pared ( $\mu\text{m}$ )		Diámetro del lumen ( $\mu\text{m}$ )	
	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media
<i>E. smithii</i>	670-1450	1017			3-10	6
<i>E. smithii</i>		700		1,9		6
<i>E. saligna</i>	808-1308	1295,5				
<i>E. maidenii</i>	858-1683	1214,5				
<i>E. dunnii</i>	530-1400	890	1,3-3,4	2,1	4,1-13,8	8,9
<i>E. benthamii</i>	429-1190	716	1,2-6,2	2,9	1,8-14,2	6,7
<i>E. globulus</i>	247-1437	876	0,6-3,5	1,7	2,2-16,1	7
<i>E. grandis</i>	205-1592	918,1	0,4-3,7	1,9	2,3-17,6	9

Fuente: elaborado en base a Villegas y Rivera (2002), Fabrowski et al. (2003), Bocage y Ulery (2005), Mantero et al. (2008), Mendoza y Rava (2009), Carrillo-Varela et al. (2019).

### 2.3.1.5 Otros

Fabrowski et al. (2003) no observaron en *E. smithii* células oleosas, floema incluso, canales intercelulares o estructuras semejantes, solo algunas bolsas de quino.

### 2.3.2 Variación de la anatomía en el árbol

De acuerdo con Tsoumis (1991) existe dentro de un árbol cierta variación horizontal y vertical en la estructura de la madera, desde la médula hasta la corteza, y desde la base hasta la copa, respectivamente; se observa un patrón general de variación horizontal que es influenciado por la edad del árbol, donde se clasifican tres periodos de desarrollo que dan el nombre a la madera producida: madera juvenil, madera adulta o madura, y madera sobremadura; la primera comprende los anillos de crecimiento próximos a la médula. Según el mismo autor, la morfología celular, principalmente la longitud, el diámetro y el espesor de la pared, varían progresiva y rápidamente hasta alcanzar un nivel “típico” asociado al desarrollo de la madera adulta.

En cuanto a la variación de caracteres anatómicos de la madera en función de la altura en el fuste, Bocage y Ulery (2005) observaron que el número de poros por  $\text{mm}^2$  aumentó con la altura, desde la base hasta los 8 centímetros de diámetro en punta fina en *E. benthamii* de 6 años. Para las características diámetro tangencial de poros y longitud promedio de elementos de vaso, estos autores no encontraron una clara variación en relación a la altura, sufriendo oscilaciones a lo largo de todo el fuste; asimismo, identificaron otros patrones de variación: el número de radios por  $\text{mm}^2$  tendió a disminuir en sentido apical, mientras que la altura promedio de estos no mostró una tendencia clara; la longitud promedio de las fibras no presentó variaciones importantes a lo largo del fuste, y tampoco lo hicieron el diámetro promedio del lumen y el espesor de pared; sin embargo, concluyeron que en la base del árbol se observaron fibras largas, con diámetros de lumen intermedios y gran espesor de pared; a la mitad del mismo se encontraron las fibras de mayor longitud, de menor diámetro y de menor espesor de pared; al 75 % de la altura comercial se observaron las fibras más cortas, con el mayor diámetro y el mayor espesor de pared; y en el tope del árbol las fibras fueron intermedias, con diámetros pequeños y escaso espesor de la pared celular. Para esta misma especie, los mayores valores de longitud de fibras y longitud de elementos del vaso se hallaron a una altura equivalente al 25 % de la altura comercial (Nisgoski et al., 1998).

En cambio, Fernández y Ros (2002) encontraron que en *E. dunnii* el diámetro de vasos disminuyó hacia el ápice del árbol, y, por el contrario, en *E. badjensis* aumentó. Sin embargo, los autores indicaron que el número de poros por  $\text{mm}^2$ , la longitud de los elementos del vaso y la altura de radios se mantuvieron invariables en ambas especies; a su vez, la longitud de las fibras promedio fue superior en la troza apical para las dos especies.

En otro orden, Pirralho et al. (2014) encontraron diferentes patrones en la variación radial del espesor de la pared de las fibras, evaluando nueve especies de *Eucalyptus*: constante a lo largo del radio, disminución hacia la corteza, aumento hacia la corteza y aumento hasta el radio medio y luego disminución. Los mismos autores observaron que la longitud de las fibras también presentó distintos patrones: aumento radial, aumento hasta el radio medio y luego disminución, y disminución hasta el radio medio con posterior aumento. Coincidiendo con el primer patrón descrito para longitud de fibras, Baldin et al. (2017) para *E. benthamii*, *E. dunnii*, *E. grandis* y *E. saligna* evidenciaron un aumento en la longitud de las fibras en sentido duramen-albura; no obstante, no observaron una tendencia clara de variación radial para el espesor de la pared de las fibras.

No se encontraron estudios que analizaran las variaciones anatómicas mencionadas para *E. smithii*.

### 2.3.3 Coeficientes del potencial de uso de la especie

La determinación de algunos indicadores, vinculados a valores biométricos de las fibras, son utilizados para evaluar las aptitudes tecnológicas de la madera, como lo son el factor o relación de Runkel, proporción o fracción de pared, coeficiente de flexibilidad, relación de esbeltez (también conocida como índice de entrelazamiento o coeficiente de rigidez), factor de forma de Luce y relación entre largo de fibra y espesor de pared celular (Bocage y Ulery 2005, Mantero et al. 2008, Pirralho et al. 2014, Baldin et al. 2017).

Mantero et al. (2008) explicaron que existen relaciones entre dimensiones de las fibras que se consideran relevantes en la producción de celulosa para papel y ayudan en la identificación de maderas. Estos autores calcularon las siguientes relaciones, utilizando los valores medios de cada característica anatómica para *E. badjensis* y *E. dunnii*:

- Factor de Runkel (FR), que expresa la relación entre el doble del espesor de la pared celular (EPC) y el diámetro del lumen (DL),  $FR = 2EPC/DL$ .
- Fracción de pared (FP), que relaciona el espesor de la pared celular (EPC) y el radio de la fibra (AF/2, siendo AF el ancho de la fibra), expresada en porcentaje ( $FP = EPC / (AF/2) \times 100$ ).
- Coeficiente de flexibilidad (CFL), que vincula el diámetro del lumen (DL) con el ancho de la fibra (AF), expresado en porcentaje ( $CFL = (DL/AF) \times 100$ ).
- Índice de entrelazamiento (IE), que es la relación entre el largo (LF) y el ancho de la fibra (AF),  $IE = LF/AF$ .
- Relación entre el largo de la fibra (LF) y el espesor de la pared celular (EPC),  $L/E = LF/EPC$ .

Pirralho et al. (2014), Baldin et al. (2017) coincidieron en el cálculo de los índices descriptos por Mantero et al. (2008), a excepción del último, y lo sustituyeron por el factor de forma de Luce, calculado de la siguiente manera:  $(AF^2 - DL^2) / (AF^2 + DL^2)$ , siendo AF el ancho de la fibra y DL el diámetro del lumen de la fibra. A continuación, en el Cuadro No. 5 se presentan valores hallados de los indicadores mencionados para diversas especies de eucalipto con potencial papelero; no se incluye a la especie de interés de este trabajo ya que no se encontraron estudios similares.

Cuadro No. 5. Indicadores del potencial de uso para celulosa y papel de algunas especies de *Eucalyptus*

Especie	Edad	FR	FP	CFL	IE	L/E	FF Luce
<i>E. benthamii</i>	6 años	0,87	46	53	57	245	-
<i>E. dunnii</i>	5 años	0,48	38	81	81	420	-
<i>E. badjensis</i>	5 años	0,49	40	80	86	434	-
<i>E. camaldulensis</i>	4 años	0,79	43	56	39	-	0,51
<i>E. globulus</i>	4 años	1,75	62	37	47	-	0,74
<i>E. tereticornis</i>	4 años	0,95	47	52	48	-	0,56
<i>E. viminalis</i>	4 años	0,54	34	65	43	-	0,39
<i>E. benthamii</i>	5 años	0,77	43	57	57	-	0,50
<i>E. dunnii</i>	5 años	1,07	51	50	59	-	0,60
<i>E. grandis</i>	5 años	0,76	42	58	58	-	0,50
<i>E. saligna</i>	5 años	0,72	41	59	69	-	0,49

Donde: FR es factor de Runkel, FP es fracción de pared en porcentaje, CFL es coeficiente de flexibilidad en porcentaje, IE es índice de entrelazamiento, L/E es relación entre largo de fibra y espesor de la pared celular, FF es factor de forma de Luce.

Fuente: elaborado en base a Bocage y Ulery (2005), Mantero et al. (2008), Pirralho et al. (2014), Baldin et al. (2017).

Según Gonçalvez, citado por Baldin et al. (2017), el factor de Runkel y la fracción de pared se relacionan a la firmeza de la fibra, en que a mayores valores, se tornan más rígidas y afectan las propiedades de resistencia del papel. Altos valores de factor de Runkel y fracción de pared, y bajos coeficientes de flexibilidad, determinan fibras poco flexibles, lo que afecta propiedades como la resistencia a la tracción y reventamiento; en cambio, mejoran la resistencia al rasgado, al igual que con altos índices de entrelazamiento (Mantero et al., 2008). Barrichelo y Brito, citados por Baldin et al. (2017), clasifican la aptitud de las fibras para la producción de papel según el factor de Runkel: hasta 0,25 consideran fibras excelentes, 0,25 – 0,50 muy buenas, 0,5 – 1,0 buenas, 1,0 – 2,0 regulares, y mayor a 2 no deberían utilizarse para la producción de papel por su bajo grado de colapso.

En cuanto al coeficiente de flexibilidad, refiere a la facilidad de unión entre las fibras y de acuerdo con Bektas et al., citados por Baldin et al. (2017), valores entre 0,50 – 0,75 clasifican a las fibras como flexibles, tendiendo a formar un papel altamente resistente. Por otro lado, estos autores indicaron que valores bajos de rigidez o índice de entrelazamiento reduce la resistencia del papel producido a causa de fibras cortas, que poseen baja superficie de contacto entre ellas, dando como resultado problemas en el encolado; finalmente, el estudio evidenció una relación directa entre el coeficiente de flexibilidad y rigidez con la longitud de las fibras.

Downes et al. (1997) sostienen que las dimensiones de las fibras más relevantes en la fabricación de pulpa y papel son la longitud, el diámetro del lumen y el espesor de la pared celular; estas dimensiones le otorgan a los papeles fabricados con eucaliptos sus características tan apreciadas (Arbuthnot, citado por Toval, 2010). En términos relativos, el ancho de las fibras es menor que la longitud, y el espesor de la pared es bastante alto en relación al diámetro del lumen (Toval, 2010). Pirralho et al. (2014) concluyeron que las especies de *Eucalyptus* presentan cierta diversidad en cuanto al potencial para producción de pulpa dada su proporción de fibras y características morfológicas; las especies se posicionan diferente en lo que respecta a la combinación de parámetros morfológicos, permitiendo la selección de acuerdo con las propiedades del papel requeridas.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 ETAPA DE CAMPO

##### 3.1.1 Descripción del sitio muestreado

Los árboles muestreados formaban parte de una plantación de once años de edad cortados en el año 2019, de la especie *E. smithii*, ubicada en el departamento de Rocha, camino Paso María Eugenia (latitud: 34°14'50" S, longitud: 54°15'42" O). El marco de plantación era de 2x2x8 metros (silvopastoreo).

Según la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (MAP. DGRN, 1976) y la cartografía de suelos CONEAT (MGAP. DGRN, 1996), los suelos se ubican dentro de la unidad Sierra de Polanco y corresponden al grupo 2.21, donde los suelos dominantes son Brunosoles Subéutricos Háplicos y Típicos; asociados a éstos se encuentran Litosoles Subéutricos Melánicos a veces muy superficiales, y Brunosoles Subéutricos Lúvicos moderadamente profundos.

##### 3.1.2 Selección de árboles

El muestreo de los árboles empleados fue llevado a cabo por personal del Departamento de Materiales y Productos Forestales del LATU (Laboratorio Tecnológico del Uruguay) de acuerdo a la siguiente metodología, se partió de una preselección de los cien mejores ejemplares del rodal conforme a las siguientes características: buenas condiciones sanitarias, rectitud de fuste y buena formación de copa, sin árboles deprimidos cercanos y DAP normales, evitando árboles de crecimiento muy reducido o acelerado. A éstos se les estimó la densidad aparente básica manteniendo fijo el sitio de evaluación en los árboles, utilizando un Pilodyn que penetra la madera con un émbolo de acero y se mide la profundidad de penetración. Se calculó el promedio y desviación estándar y se seleccionaron diez individuos dentro de ese rango, de los cuales se obtuvo una troza por árbol de 2 a 2,5 metros desde la base.

##### 3.1.3 Obtención de discos

A partir de las trozas se obtuvieron dos discos por cada individuo de 5 a 6,5 centímetros de espesor, a dos alturas diferentes: 1,30 metros y 2 metros, obteniéndose un total de 20 discos.

## 3.2 ETAPA DE LABORATORIO

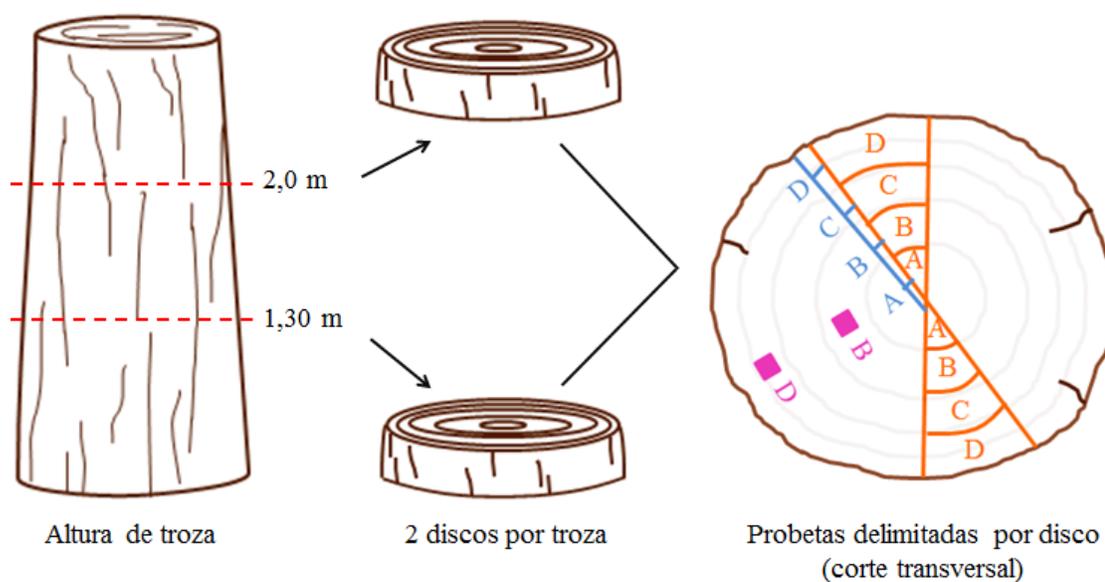
### 3.2.1 Obtención de probetas

De cada disco se obtuvieron tres tipos de probetas: para el cálculo de DApB, para evaluar anatomía mediante preparados histológicos y para macerados (Figura No. 2). En primer lugar, se identificó madera anormal con defectos como nudos, ramas o bolsas de quino para descartar esas zonas, ya que se trata de madera sin características normales y por lo tanto no son adecuadas para caracterizar las propiedades anatómicas y físicas de la madera.

Las probetas para determinar densidad se cortaron a lo largo del radio del disco, en cuatro secciones de igual espesor desde médula a corteza (A, B, C y D, respectivamente) y en duplicado, obteniéndose 16 probetas por árbol (160 en total).

Para los macerados, las probetas se cortaron adyacentes al centro de las secciones A a D determinadas para DApB, y de unos pocos milímetros de espesor, para obtener de allí la muestra de longitud de fibras y longitud de elementos del vaso, obteniéndose ocho probetas por árbol (80 en total).

Las probetas para preparados histológicos se obtuvieron de dos zonas posiblemente contrastantes respecto a sus propiedades anatómicas y físicas, correspondientes a madera juvenil y adulta, coincidiendo con las secciones B y D de densidad. Se obtuvieron cuatro probetas por árbol (40 en total). Éstas fueron fraccionadas para poder procesarse en el micrótopo y así obtener los preparados histológicos.



En anaranjado se indican las probetas para el cálculo de DApB (duplicadas), en celeste las probetas para macerados y en rosado las probetas para preparados histológicos.

Figura No. 2. Obtención de los discos y delimitación de las probetas

### 3.2.2 Materiales y procedimiento para el cálculo de la DApB

Las probetas para dicho fin fueron secadas en estufa a 60 °C durante una semana con el objetivo de conservarlas, dadas las condiciones sanitarias del país que obligaron a interrumpir el trabajo por nueve meses.

Los materiales utilizados fueron:

- recipientes plásticos;
- papel absorbente;
- agua destilada
- balanza analítica marca Shimadzu, modelo ATX 224 (220 g x 0,1 mg);
- balanza electrónica de precisión marca Radwag, modelo WTC 2000 (2000 g x 0,01 g);
- bandejas de aluminio;
- vaso de bohemia 2000 ml;
- estufa de laboratorio.

El procedimiento utilizado para la determinación de densidad de la madera se basó en la norma T258 om-02 (TAPPI, 2006). Las probetas fueron sumergidas en

recipientes con agua destilada durante 48 horas, con el propósito de asegurarse que la muestra se hinchara a su volumen verde o saturado, y eliminar posibles errores por absorción de agua de la madera mientras se pesaba para obtener el volumen. Luego se extrajo el exceso de agua de las probetas con papel y se pesaron, obteniendo de esta forma el peso saturado o verde.

Posteriormente se determinó el volumen verde de las probetas mediante la cantidad de agua desplazada por la muestra al colocarla en inmersión en un recipiente con agua destilada, a través del principio de Arquímedes. Se sumergió la probeta teniendo la precaución de que no tocara los lados del recipiente. El volumen verde ( $\text{cm}^3$ ) de la probeta equivale al volumen del agua desplazada por la misma, y asumiendo densidad =  $1 \text{ g/cm}^3$ , se iguala con el peso.

Luego las probetas fueron introducidas en el horno de secado a  $103 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta peso constante, para así obtener el peso anhidro en gramos. Con los datos de peso anhidro ( $P_a$ ) y volumen verde ( $V_v$ ) de las probetas, se procedió a calcular la  $DApB = P_a/V_v$ .

### 3.2.3 Materiales y procedimiento para el estudio anatómico

#### 3.2.3.1 Confección de preparados histológicos

Los materiales utilizados fueron:

- micrótopo de deslizamiento marca Leica, modelo SM 2010 R;
- microscopio óptico marca Nikon, modelo Eclipse E200 LED;
- hipoclorito de sodio;
- agua destilada;
- safranina alcohólica;
- alcohol 95 % y 100 %;
- Entellan®;
- portaobjetos y cubreobjetos.

Las probetas se hirvieron en agua durante 24 horas con el fin de ablandarlas; luego se colocaron en el micrótopo y se hicieron cortes en 2 planos: transversal (tr) y longitudinal tangencial (tg) de  $20\text{-}30\mu\text{m}$  de espesor. Se verificó el correcto plano de corte con el microscopio y se obtuvieron 8 preparados por árbol (un total de 80). Además, se realizaron algunos cortes radiales para la descripción cualitativa de los radios leñosos.

Luego se realizó un blanqueo de los preparados con hipoclorito de sodio durante 15 minutos, se enjuagaron con agua destilada y se tiñeron con safranina alcohólica durante 10 minutos.

A continuación, se deshidrataron con alcohol 95 % y alcohol 100 % respectivamente, de 10-15 minutos cada uno y finalmente se montaron los preparados en el portaobjeto con Entellan®. Se cubrió teniendo la precaución de no dejar burbujas de aire y se identificó cada preparado histológico con la etiqueta correspondiente. Se observaron en microscopio con lentes objetivas con aumento de 4x y 10x, y se obtuvieron las fotografías de los mismos.

### 3.2.3.2 Confección de macerados

Los materiales empleados fueron:

- tubos de ensayo;
- ácido acético glacial;
- peróxido de hidrógeno;
- agua destilada;
- estufa de laboratorio;
- portaobjetos y cubreobjetos;
- microscopio óptico.

Las probetas de pocos milímetros de espesor se colocaron en tubos de ensayo previamente identificados y se adicionó una solución de ácido acético glacial y peróxido de hidrógeno en relación 1:1. Los tubos se dejaron macerando en la estufa a 70 °C durante 24 horas, evitando que el proceso de maceración fuera excesivo y produjera rupturas de fibras.

Posteriormente se retiró el excedente de solución y se enjuagó dos veces con agua destilada. Luego se cerró el frasco y se agitó moderadamente con el objetivo de desagregar la muestra. La mezcla macerada diluida en agua destilada se distribuyó sobre el portaobjeto, cubriéndola con cubreobjeto. Finalmente se procedió a la observación en microscopio con lentes objetivas con aumento de 4x y 10x, y a la obtención de fotografías.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS MEDIDAS

Para llevar a cabo las mediciones sobre los preparados realizados se utilizó el software ImageJ 2.3.0, el cual permite procesar y analizar imágenes digitales. Éstas se obtuvieron con una cámara Nikon DS-Fi3 acoplada a un microscopio óptico y a una computadora mediante el software NIS-Elements F Ver.4.60, que permite capturar imágenes desde el microscopio.

A fin de poder realizar las mediciones se debieron calibrar las imágenes. Para ello, se utilizaron dos reglillas, una ocular y otra objetiva, en que la primera posee grabada una escala con cincuenta divisiones que se debieron calibrar en micras para cada uno de los objetivos, utilizando la reglilla objetiva que consta de cien divisiones (10  $\mu\text{m}$  cada una). Se compararon ambas para así obtener el valor de cada unidad arbitraria (UA) de la reglilla ocular para cada aumento.

Todas las características fueron medidas según LPF (1991).

#### 3.3.1 Características medidas sobre corte transversal

a) Espesor de la pared de las fibras: para obtener este valor se midieron las paredes de dos fibras contiguas (distancia de lumen a lumen), tomando así el doble del espesor de la pared; dicho valor se dividió entre dos para obtener el espesor de la pared en micras ( $\mu\text{m}$ ).

b) Diámetro del lumen de las fibras: para el diámetro del lumen se midió la longitud en dos sentidos (tg y rd) excluyendo la pared, luego se promedió ambas medidas para conseguir el diámetro del lumen en micras. Para ambas características se tomaron 25 fibras por preparado.

c) Diámetro tangencial del lumen del vaso: el diámetro tangencial del lumen se midió de forma perpendicular a los radios en micras; se tomaron 25 vasos por preparado.

d) Número de poros por  $\text{mm}^2$ : para contabilizar el número de poros por  $\text{mm}^2$  se marcó un área rectangular apropiada al tamaño y distribución de estos; se contaron todos individualmente, tomando el valor de 1 cuando estaban enteros, y de 0,5 cuando estaban parcialmente dentro del área. Así se obtuvo el número de poros en dicha área ( $\mu\text{m}^2$ ), la cual se llevó a  $\text{mm}^2$  y finalmente a 1  $\text{mm}^2$ . Se tomaron 10 áreas por preparado.

### 3.3.2 Características medidas sobre corte longitudinal tangencial

a) Altura de radios en micras ( $\mu\text{m}$ ) y en número de células: la altura de los radios en micras se obtuvo al medir de un extremo al otro del radio, y la altura en número de células se obtuvo al contabilizar cuantas células componían la altura total. Se tomaron 25 radios por preparado en ambos casos.

b) Número de radios por mm lineal: se contabilizó el número de radios en una línea trazada perpendicular a sus ejes ( $\mu\text{m}$ ), y luego se llevó a 1 mm lineal. Se trazaron 10 líneas por preparado.

### 3.3.3 Características medidas sobre macerados

a) Longitud y ancho total de fibras: se midió la longitud total de fibras enteras a lo largo de su eje, y el ancho total en micras. Se tomaron 25 fibras por preparado.

b) Longitud de elementos del vaso: se midió la longitud total de cada elemento de vaso entero a lo largo de su eje en micras. Se tomaron 25 elementos de vaso por preparado.

## 3.4 RELACIONES ENTRE DIMENSIONES FUNDAMENTALES DE LAS FIBRAS

Fueron calculadas las siguientes relaciones entre los promedios de las medidas de las fibras que se consideran relevantes para la producción de celulosa y papel:

- Factor de Runkel,  $FR = 2EPC/DL$  (EPC: espesor de la pared celular; DL: diámetro del lumen).
- Fracción de pared,  $FP = [EPC/(AF/2)] \times 100$  (AF: ancho de fibra).
- Coeficiente de flexibilidad,  $CFL = (DL/AF) \times 100$ .
- Índice de entrelazamiento,  $IE = LF/AF$  (LF: longitud de fibra).
- Relación entre la longitud de la fibra y el espesor de la pared celular,  $L/E = LF / EPC$ .
- Factor de forma de Luce =  $(AF^2 - DL^2) / (AF^2 + DL^2)$ .

## 3.5 ANÁLISIS DE DATOS

Se evaluó un total de once variables cuantitativas: ocho continuas, como el espesor de la pared y el diámetro del lumen de las fibras, diámetro tangencial del lumen de los vasos, altura de radios en micras, longitud y ancho de fibras, longitud de elementos de vaso y densidad aparente básica; y tres discretas, como el número de poros por  $\text{mm}^2$ , número de radios por mm lineal y altura de radios en número de células. Para

las variables continuas se utilizó un modelo lineal general para el análisis de varianza (ANOVA), verificando el supuesto de distribución normal de los residuos mediante el test de normalidad Anderson-Darling, y el supuesto de homogeneidad de varianza con la prueba de Levene; cuando la homogeneidad de varianza no se cumplió se modeló la misma mediante la función “varldent”. Para las variables discretas se utilizó un modelo lineal generalizado mixto, dado que no siguen una distribución normal.

Los factores testeados en el ANOVA fueron la altura con dos niveles (1,30 metros y 2 metros), la posición radial con dos o cuatro niveles según la variable en cuestión, la interacción altura por posición radial, y el árbol como factor aleatorio dado que todas las variables se midieron en un mismo individuo. El espesor de pared y el diámetro del lumen de las fibras, el diámetro tangencial del lumen del vaso, la altura de radios en micras, el número de poros por  $\text{mm}^2$ , el número de radios por mm lineal y la altura de radios en número de células se evaluaron en dos posiciones radiales (B y D), y la densidad, la longitud y ancho de las fibras y la longitud de los elementos del vaso en cuatro posiciones radiales (A, B, C y D).

Se realizó un test de medias para las variables y los factores que fueron significativos en el ANOVA, con un nivel de significancia de 0,05. Para llevar a cabo el análisis estadístico del presente trabajo se utilizó el software libre R versión 3.6.0 (R Core Team, 2019).

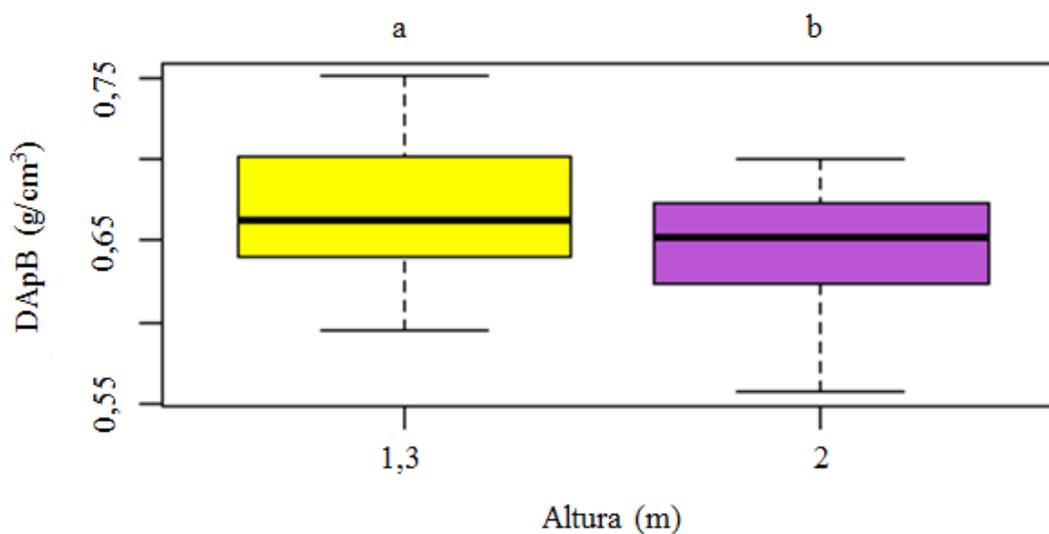
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 DENSIDAD APARENTE BÁSICA

La densidad aparente básica promedio fue de  $0,66 \text{ g/cm}^3$  ( $s = 0,04$ ;  $CV = 6 \%$ ; mínimo:  $0,56 \text{ g/cm}^3$ ; máximo:  $0,75 \text{ g/cm}^3$ ). Este resultado difiere de los obtenidos por Clarke et al., citados por Fabrowski et al. (2003), y por Carrillo-Varela et al. (2018), que obtuvieron valores de  $0,525$  a  $0,570 \text{ g/cm}^3$ , y  $0,484 \text{ g/cm}^3$  promedio, respectivamente, en árboles de seis años. Estas diferencias podrían deberse a que los individuos evaluados por los autores mencionados eran de menor edad que los utilizados en este trabajo y posiblemente aún no han desarrollado leño adulto. El leño juvenil se caracteriza por presentar fibras más cortas, con menor espesor de pared y densidad más baja que el leño adulto (Tsoumis, 1991).

La densidad de plantación también podría estar explicando las diferencias encontradas entre los resultados obtenidos en esta tesis respecto a los autores mencionados anteriormente. En un sistema agroforestal, se esperaría un mayor crecimiento de los árboles, resultando en árboles con menor densidad de la madera, debido a una mayor disponibilidad de recursos por árbol (Kruchelski et al., 2021), lo que favorecería la formación de mayor porcentaje de leño juvenil (Tsoumis, 1991). Sin embargo, el presente trabajo encontró valores de densidad de la madera mayor a lo encontrado por otros autores, lo que llevaría a hipotetizar que la mayor densidad es debida a una mayor relación duramen/albura, pero como no se determinó dicha relación en este trabajo, no se puede llegar a una conclusión. Trabajos futuros deberían investigar el efecto de plantaciones de *E. smithii* en diferentes espaciamientos en la densidad de la madera, porcentaje de madera juvenil y proporción de duramen.

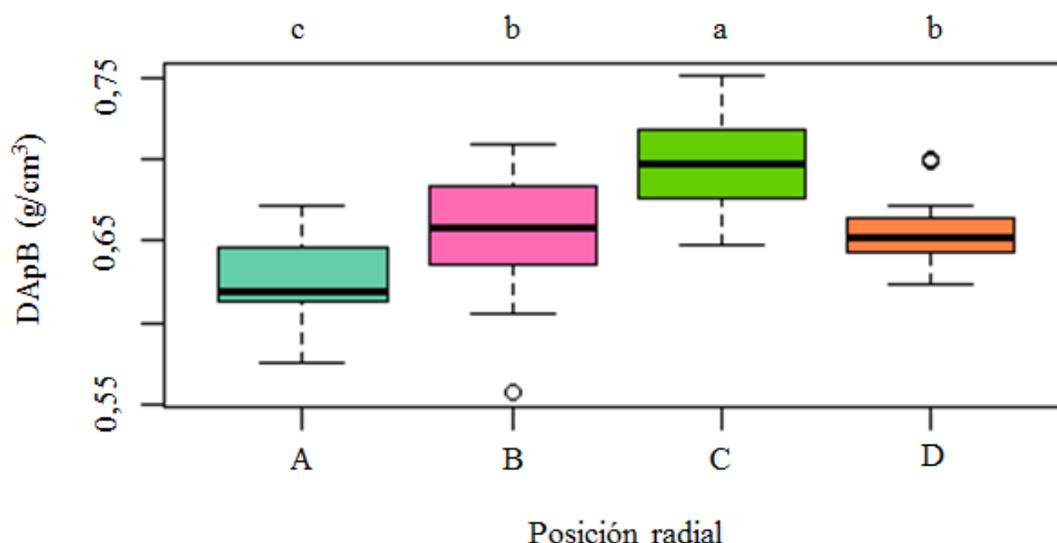
Se encontraron diferencias significativas para la DApB entre las alturas y las posiciones radiales evaluadas, como se muestra en las figuras No. 3 y No. 4. No hubo interacción significativa entre estos factores.



Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p < 0,05$ ).

Figura No. 3. Densidad aparente básica ( $\text{g/cm}^3$ ) según la altura

La altura de 1,3 metros presentó una densidad promedio de  $0,67 \text{ g/cm}^3$  ( $s = 0,04$ ;  $\text{CV} = 6 \%$ ; mínimo:  $0,59 \text{ g/cm}^3$ ; máximo:  $0,75 \text{ g/cm}^3$ ), significativamente mayor que los 2 metros con un valor promedio de  $0,65 \text{ g/cm}^3$  ( $s = 0,04$ ;  $\text{CV} = 6 \%$ ; mínimo:  $0,56 \text{ g/cm}^3$ ; máximo:  $0,70 \text{ g/cm}^3$ ). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Mantero et al. (2008) para *E. dunnii*, quienes observaron una disminución de la DApB desde la base hasta la porción media del fuste comercial. Sin embargo, difieren de los resultados de Igartúa y Monteoliva (2010) para *E. globulus* donde la densidad aumentó en sentido apical. Cabe mencionar que dicho aumento encontrado por estos autores se registró a partir de los 4 metros aproximadamente, lo cual podría explicar la diferencia con este estudio donde no se evaluó más allá de los 2 metros.



Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p < 0,05$ ). Círculos blancos indican valores atípicos.

Figura No. 4. Densidad aparente básica ( $\text{g/cm}^3$ ) según la posición radial

La posición C mostró una densidad promedio significativamente mayor que las demás con un valor de  $0,698 \text{ g/cm}^3$ ; y la posición más cercana a la médula (A) fue la que presentó el valor significativamente menor ( $0,624 \text{ g/cm}^3$ ). Este comportamiento de la densidad se puede explicar por la madera juvenil del árbol que forma un cilindro central alrededor de la médula, y como se mencionó previamente, posee características anatómicas que le atribuyen menor densidad en comparación con la madera adulta; y a su vez, la mayor densidad en la posición C puede atribuirse a la formación de duramen, que implica una deposición de extractivos en las cavidades y paredes celulares, aumentando así la densidad en relación a la albura, que se observa en la posición D (Tsoumis, 1991). Estos resultados se asemejan a los descriptos por Downes et al. (1997) en *E. grandis*, *E. nitens*, *E. regnans* y *Eucalyptus obliqua* L'Heritier, y por Cardoso et al. (2013) en *E. tereticornis* de cincuenta años, en que la densidad de la madera aumenta al alejarse de la médula.

## 4.2 CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS

### 4.2.1 Elementos vasculares

#### 4.2.1.1 Resultados generales

Los poros son visibles a ojo desnudo, en su mayoría solitarios, de contorno redondeado, en arreglo diagonal respecto a los radios, con porosidad difusa (Figura No. 5); elementos del vaso con o sin apéndices, en un extremo o en ambos, con placas de perforación simples, puntuaciones areoladas alternas, de contorno redondeado (Figura No. 6); puntuaciones semiareoladas de bordes reducidos y contorno redondeado; tílides presentes pero no abundantes. Fabrowski et al. (2003) encontraron resultados muy similares para la especie.

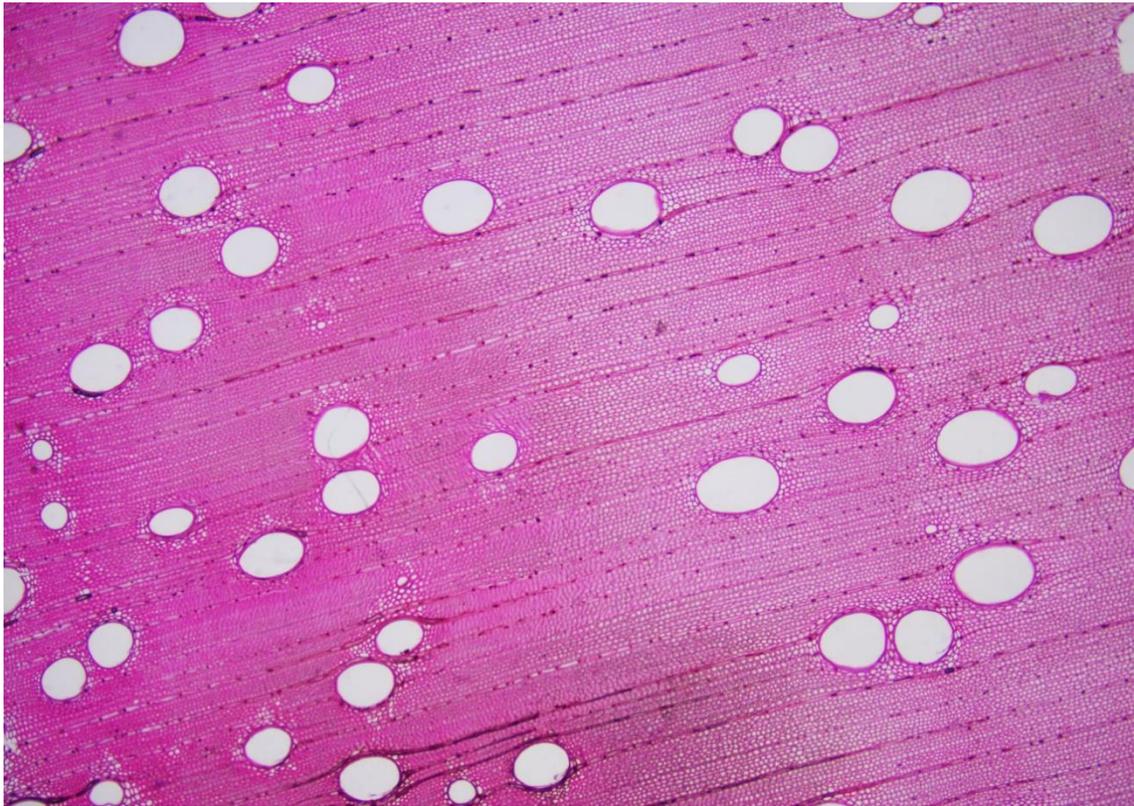


Figura No. 5. Poros visibles en corte transversal de un preparado histológico (4x)

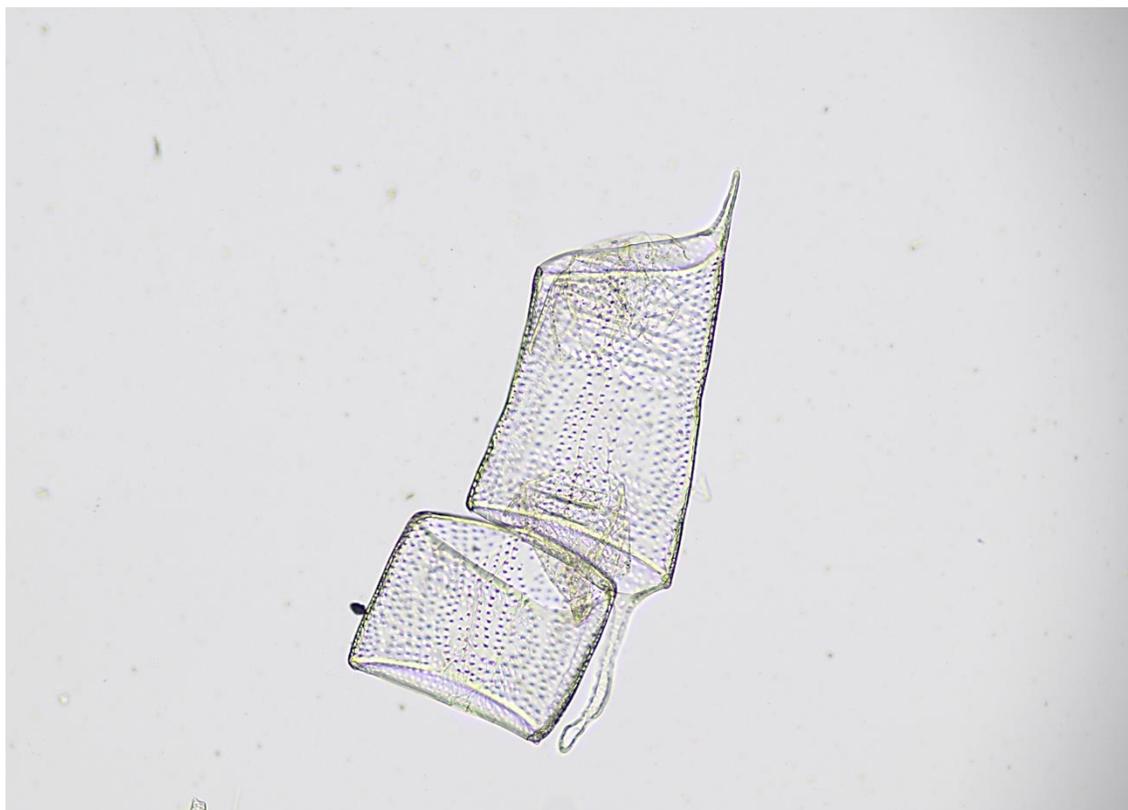


Figura No. 6. Elementos del vaso vistos en preparado macerado (10x)

En el cuadro No. 6 se presentan los resultados generales obtenidos para las características medidas de los elementos vasculares.

Cuadro No. 6. Resultados estadísticos para las características vasculares

	Diámetro tg del lumen del vaso ( $\mu\text{m}$ )	Número de poros/ $\text{mm}^2$	Longitud de elementos del vaso ( $\mu\text{m}$ )
Promedio	119,08	8,28	323,5
Mínimo	92,69	5	184,97
Máximo	144,24	13	453,23
Desvío estándar	12,77	1,84	57,5
CV* (%)	10,72	22,22	17,77

\*CV: coeficiente de variación.

Fabrowski et al. (2003) encontraron valores muy semejantes para el número de poros por  $\text{mm}^2$ : 8 poros promedio, variando entre 5 a 10. Respecto al diámetro tangencial del lumen del vaso, el promedio es similar al hallado por Fabrowski et al. (2003) para la misma especie en Paraná, Brasil (126  $\mu\text{m}$ ), aunque encontraron un rango más amplio (70 a 180  $\mu\text{m}$ ). A su vez, la longitud de los elementos vasculares fue inferior a la hallada por los mismos autores: 373  $\mu\text{m}$  promedio, variando entre 230 a 550  $\mu\text{m}$ . Las diferencias mencionadas si bien son leves, podrían explicarse en primera medida por factores ambientales, ya que se trata de la misma especie, creciendo en distintas latitudes y condiciones del sitio. Van den Oever et al., Chen et al., citados por León y Espinoza de Pernía (2001) encontraron que a mayores latitudes, la longitud de los elementos vasculares y el diámetro de los poros disminuye en distintas familias de latifoliadas. Esta influencia de la latitud en la anatomía de la madera se relaciona con la temperatura y disponibilidad de agua, observándose una tendencia al acortamiento de los elementos vasculares al disminuir la humedad relativa (León y Espinoza de Pernía, 2001). En regiones de mayor disponibilidad de agua y requerimientos de transpiración, los vasos se ensanchan generando una mayor eficiencia en la conducción (Wilkins y Papassotiriou, citados por León y Espinoza de Pernía, 2001).

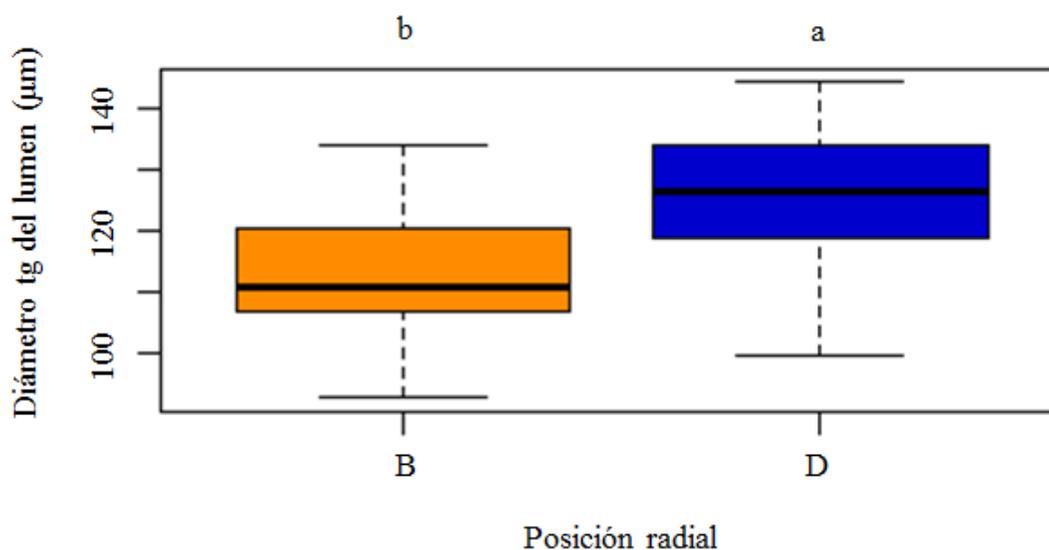
#### 4.2.1.2 Resultados en función de la altura y la posición radial

Para la característica número de poros por  $\text{mm}^2$  no hubo diferencias significativas entre los niveles de los factores estudiados. Fernández y Ros (2002) coinciden respecto a la altura, en que la frecuencia de vasos se mantiene prácticamente constante a lo largo del fuste para *E. dunnii* y *E. badjensis*; en cambio, Bocage y Ulery (2005) encontraron un aumento en la frecuencia a medida que aumenta la altura en *E. benthamii*. Respecto a la posición radial, los resultados discrepan con los antecedentes de Hillis (1978), Tomazello Filho (1985) que describen una disminución en el número de poros por  $\text{mm}^2$  desde la médula hacia la corteza en varias especies del género.

Para el diámetro tangencial del lumen del vaso según la altura, no se encontraron diferencias significativas, y tampoco hubo interacción significativa entre posición radial y altura. Bocage y Ulery (2005) observaron algo similar para esta característica, ya que no encontraron una tendencia clara de variación en función de la altura del árbol para *E. benthamii*. En cambio, Fernández y Ros (2002) concluyeron que el diámetro de vasos disminuyó hacia el ápice en *E. dunnii* y aumentó en *E. badjensis*. Por otro lado, si hubo diferencias entre las posiciones radiales, siendo mayor el diámetro promedio en la posición D -más cercana a la corteza- respecto a la posición B -más cercana a la médula- (Figura No. 7). Estos resultados coinciden con los descriptos por Hillis (1978), Tomazello Filho (1985), Jelvez (2009), para *Eucalyptus* spp., donde el diámetro de los vasos aumenta desde la médula hacia la corteza.

De acuerdo con Tsoumis (1991), la diversidad de factores que componen el microambiente en el que crece un árbol van cambiando y eso contribuye a la variación

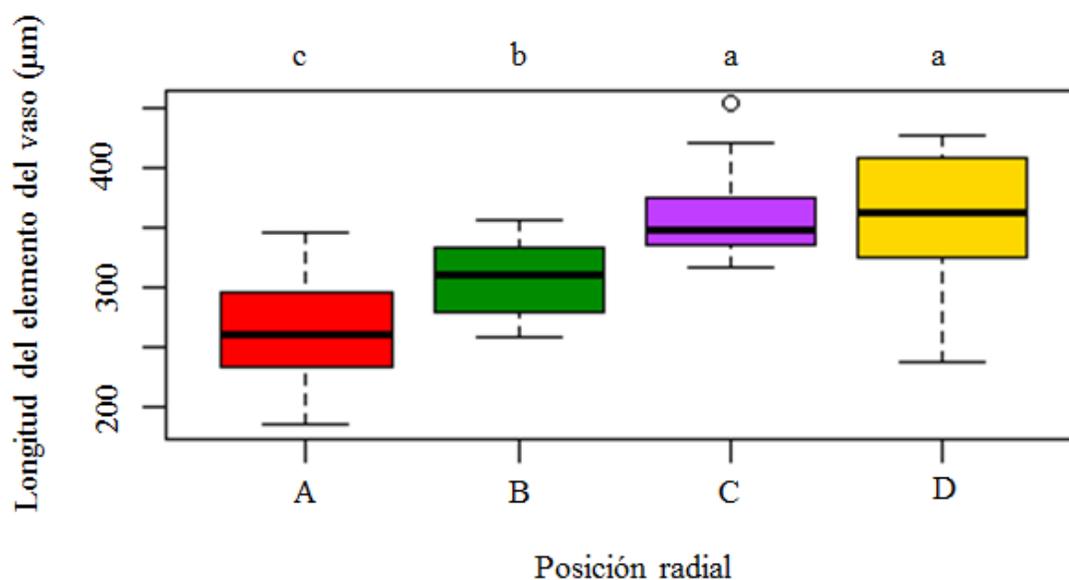
de la estructura de la madera dentro de un anillo de crecimiento y entre anillos. Las dimensiones de los elementos vasculares dentro de una planta pueden variar en función de la posición, del tipo de madera (normal o de reacción) y de las condiciones del sitio; en condiciones de aridez se observa una disminución de la longitud y diámetro de los elementos vasculares, y un aumento en el espesor de las paredes, según León y Espinoza de Pernía (2001). Las especies con alta tasa de transpiración presentan una baja frecuencia de vasos pero con diámetros amplios, lo que los convierte en eficientes conductores (Baas et al., citados por León y Espinoza de Pernía, 2001).



Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p < 0,05$ ).

Figura No. 7. Diámetro tangencial del lumen del vaso ( $\mu\text{m}$ ) según la posición radial

Finalmente, la longitud de elementos del vaso sólo presentó diferencias significativas para la posición radial ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), mostrando la misma variación que el diámetro del lumen, en que aumentó en sentido médula-corteza, aunque las posiciones C y D no mostraron diferencias significativas (Figura No. 8). Este patrón de aumento en sentido radial para la longitud de los elementos vasculares coincide con lo observado por Moglia et al. (2008) para *E. camaldulensis*; y es coherente con lo descrito por Tsoumis (1991), en que los anillos de crecimiento próximos a la médula constituyen la madera juvenil y presentan entre otras características estructurales, células de menor longitud en relación a la madera adulta que se genera más tarde en la vida del árbol, y que se caracteriza por alcanzar un nivel “típico” de organización estructural. En base a lo mencionado, las posiciones C y D podrían indicar la presencia de leño adulto.



Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p < 0,05$ ). Círculos blancos indican valores atípicos.

Figura No. 8. Longitud del elemento del vaso ( $\mu\text{m}$ ) según la posición radial

#### 4.2.2 Parénquima axial y radial

El parénquima axial fue definido como paratraqueal vasicéntrico, a vasicéntrico confluyente. Esta descripción coincide con la propuesta por Fabrowski et al. (2003), aunque también encontraron parénquima paratraqueal aliforme.

Los radios son heterogéneos, con una fila de células procumbentes marginales, más altas que las células procumbentes centrales (Figura No. 9), esta observación coincide con la descrita por Dadswell (1972) para *Eucalyptus*, en que describe la presencia de radios débilmente heterocelulares; son uniseriados (Figura No. 10); la altura varía entre 119,57 a 313,09  $\mu\text{m}$ , con media de 229,05  $\mu\text{m}$  ( $s = 38,14$ ;  $\text{CV} = 16,65$  %), y de 11 a 19 células, con media de 14 ( $s = 2$ ;  $\text{CV} = 14,28$  %); fueron encontrados entre 10 a 15 radios por mm lineal, con media de 12,85 radios ( $s = 1,14$ ;  $\text{CV} = 8,87$  %).

Fabrowski et al. (2003), sin embargo, describen radios homogéneos compuestos por células procumbentes; y para la altura encontraron valores de 38 a 300  $\mu\text{m}$ , con media de 155  $\mu\text{m}$ ; y de 2 a 19 células, con media de 9. Los valores promedio medidos en el presente trabajo son superiores a los encontrados por los autores mencionados anteriormente, lo que podría explicarse por los mínimos que son muy bajos, ya que los valores máximos coinciden en ambos casos. En cuanto al número de radios por mm

lineal, los mismos autores encontraron un promedio de 10, variando entre 7 a 14 radios/mm lineal, valores comparables a los del presente trabajo.

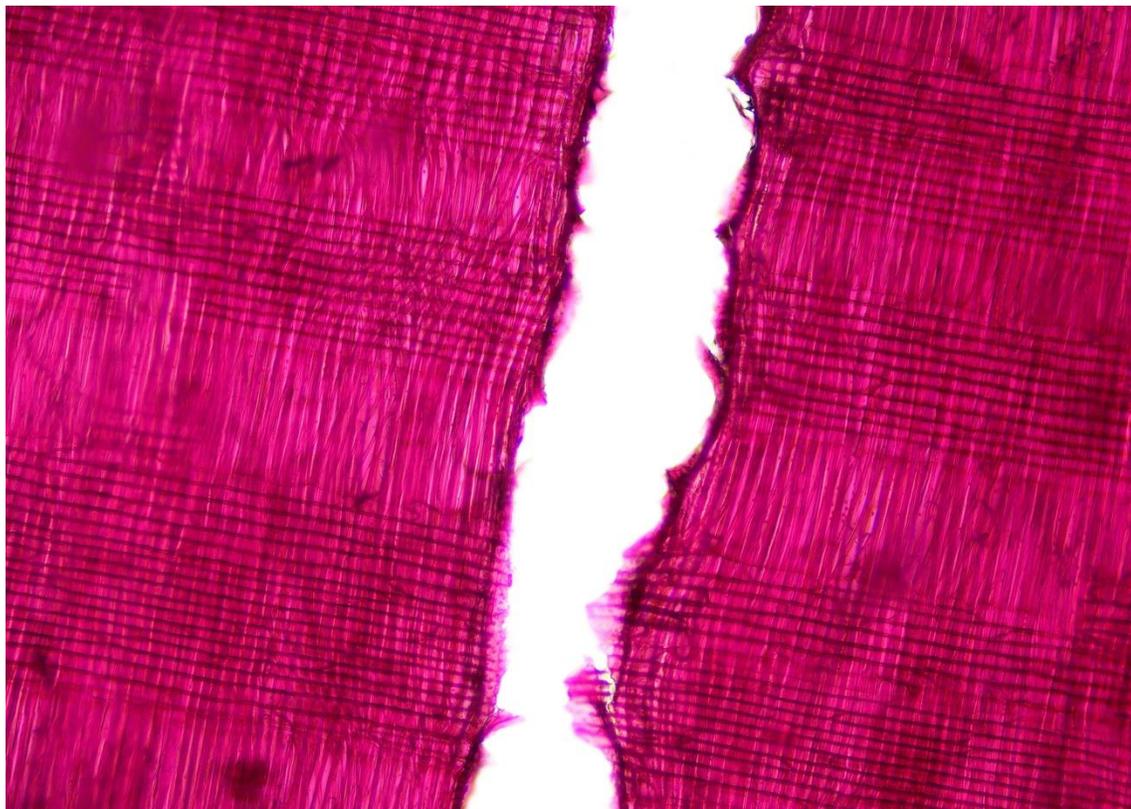


Figura No. 9. Radios débilmente heterogéneos vistos en corte radial (10x)

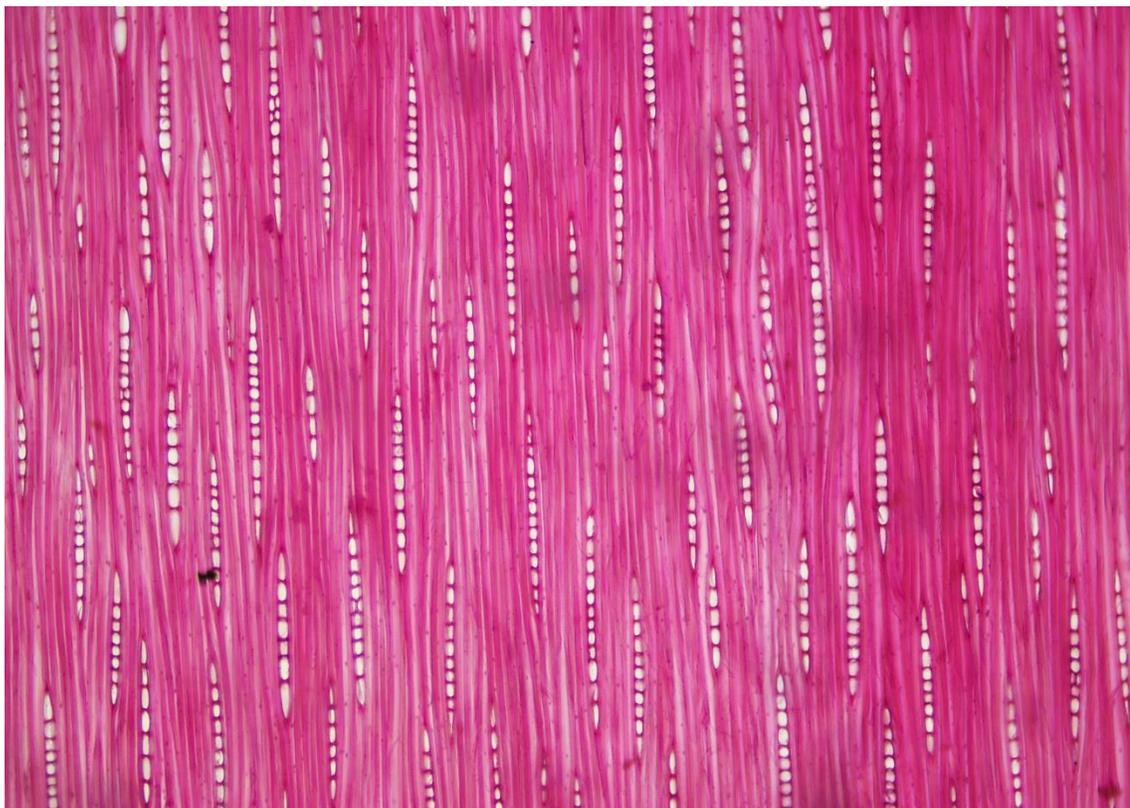


Figura No. 10. Radios uniseriados vistos en corte tangencial (10x)

Respecto a la variación radial y en altura, y la interacción entre estos factores, de las características medidas en los radios, no se encontraron diferencias significativas en ningún caso. Para la altura de radios en micras y en células, los resultados obtenidos por Fernández y Ros (2002) en otras especies de *Eucalyptus* coinciden, ya que se mantienen constantes a lo largo del fuste. Sin embargo, respecto a la frecuencia de radios, los resultados discrepan con lo observado por Fernández y Ros (2002), Bocage y Ulery (2005), en *E. dunnii* y *E. benthamii*, respectivamente, la cual presentó una tendencia a disminuir a medida que aumenta la altura en el árbol. Esta diferencia se podría deber a que sólo se tomaron 2 alturas y cercanas entre sí en la presente investigación.

### 4.2.3 Fibras

#### 4.2.3.1 Resultados generales

Las fibras libriformes son no septadas, de extremos ahusados, cortas y con paredes delgadas a gruesas (Figura No. 11). El espesor de la pared, el diámetro del lumen, la longitud y el ancho total de las fibras se muestran en el Cuadro No. 7.

Cuadro No. 7. Resultados estadísticos para las características de las fibras

	Espesor de la pared ( $\mu\text{m}$ )	Diámetro del lumen ( $\mu\text{m}$ )	Longitud total ( $\mu\text{m}$ )	Ancho total ( $\mu\text{m}$ )
Promedio	2,05	9,21	1087,9	16,66
Mínimo	1,14	6,46	704,55	13,4
Máximo	3,42	12,36	1354,15	19,58
Desvío estándar	0,5	1,63	168,58	1,32
CV (%)	24,39	17,69	15,49	7,92

Los resultados promedio obtenidos son mayores a los de Fabrowski et al. (2003), que encontraron valores para la longitud de fibras de 1017  $\mu\text{m}$ , ancho de 11  $\mu\text{m}$  y 6  $\mu\text{m}$  para el diámetro del lumen; aunque la longitud y el diámetro del lumen registrados en el presente trabajo se encuentran dentro de los rangos encontrados por estos autores.



Figura No. 11. Fibra libriforme vista en preparado macerado (4x)

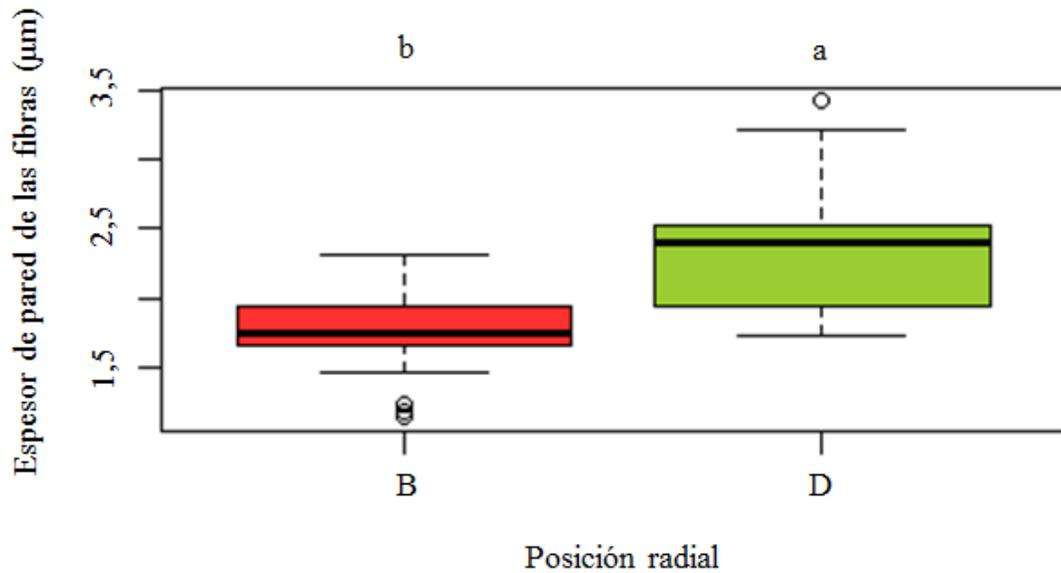
#### 4.2.3.2 Resultados en función de la altura y la posición radial

El diámetro del lumen de las fibras no presentó interacción, ni diferencias significativas para ninguno de los factores estudiados; el espesor de pared y el ancho total fueron significativos sólo para la posición radial; y para la longitud total hubo diferencias significativas tanto para la altura como para la posición radial.

Respecto al diámetro del lumen, Ramos et al. (2011) tampoco encontraron diferencias para la variación radial en *E. grandis*; sin embargo, Tomazello Filho (1985) concluyó que tiende a aumentar en sentido médula-corteza en dos especies estudiadas (*E. grandis* y *E. saligna*). Bocage y Ulery (2005), si bien no observaron una tendencia clara de variación con la altura, describen que al 75 % de la altura comercial ocurre el pico máximo para el diámetro del lumen, con oscilaciones en las alturas previas evaluadas para *E. benthamii*.

El espesor de pared fue mayor en la posición D respecto a la B (Figura No. 12 y Cuadro No. 8). Esto concuerda con lo observado por Tomazello Filho (1985), Ramos et al. (2011), Pirralho et al. (2014), en donde el espesor de pared aumentaba hacia la

corteza en algunas especies del género. La posición D podría corresponder a leño adulto, ya que según Tsoumis (1991) dicha madera presenta paredes celulares de mayor espesor en relación a la madera juvenil, y al formarse luego del desarrollo de ésta, comprende los anillos de crecimiento que se encuentran alejados de la médula.



Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p < 0,05$ ). Círculos blancos indican valores atípicos.

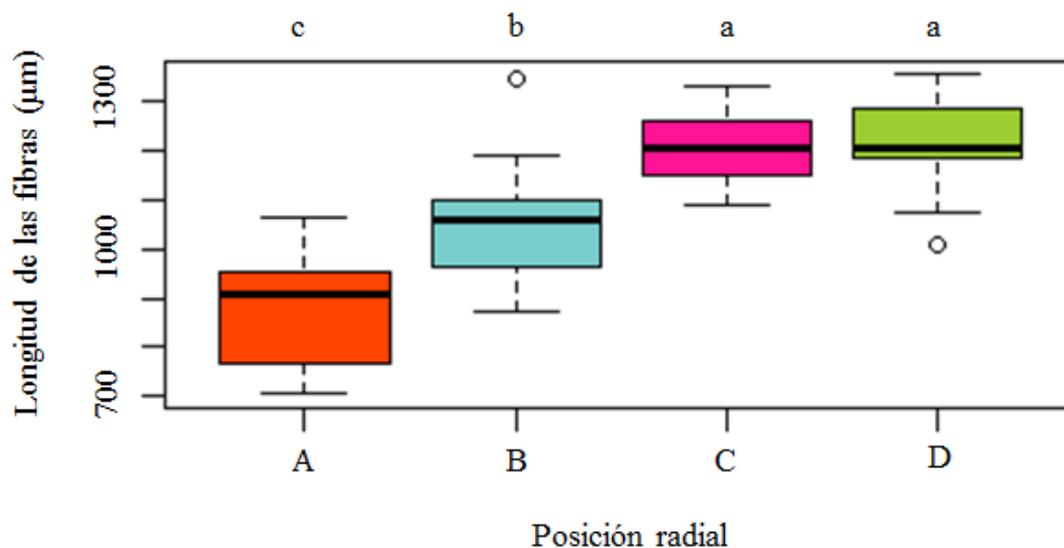
Figura No. 12. Espesor de la pared de las fibras ( $\mu\text{m}$ ) según la posición radial

Cuadro No. 8. Resultados estadísticos para las características de las fibras según la posición radial

		Posición radial			
		A	B	C	D
Espesor de pared ( $\mu\text{m}$ )	Promedio		1,75 <b>b</b>		2,34 <b>a</b>
	Rango		1,14 – 2,31		1,72 – 3,42
	Desvío		0,32		0,48
	CV (%)		18,28		20,51
Ancho ( $\mu\text{m}$ )	Promedio	16,25 <b>b</b>	16,45 <b>ab</b>	16,89 <b>ab</b>	17,08 <b>a</b>
	Rango	13,77 – 18,46	13,85 – 19,58	13,4 – 18,61	14,94 – 19,27
	Desvío	1,37	1,51	1,2	1,09
	CV (%)	8,43	9,17	7,10	6,38
Longitud ( $\mu\text{m}$ )	Promedio	877,75 <b>c</b>	1051,48 <b>b</b>	1205,47 <b>a</b>	1216,91 <b>a</b>
	Rango	704 – 1062	872 – 1345	1087 – 1328	1009 – 1354
	Desvío	113,42	110,22	70,13	91,02
	CV (%)	12,92	10,48	5,81	7,47

En el Cuadro No. 8 se observa que para el ancho de fibra sólo hubo diferencias significativas entre las posiciones A y D (la más cercana a la médula y la más cercana a la corteza, respectivamente), siendo menor en A, lo cual era esperado al tratarse de madera juvenil, que de acuerdo con García Esteban et al. (2003) se caracteriza por tener células de paredes más delgadas y menor contenido celular. De igual manera, Tomazello Filho (1985) observó aumentos en esta característica en la dirección radial para dos especies de *Eucalyptus*.

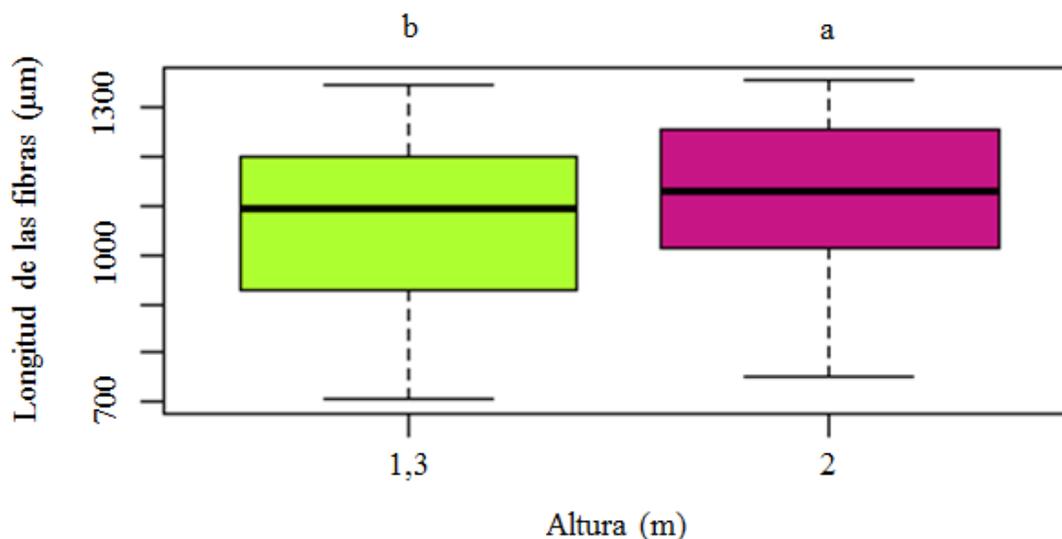
La longitud total de las fibras no mostró diferencias significativas entre las posiciones C y D, pero sí entre estas y las demás (Cuadro No. 8 y Figura No. 13), aumentando desde A hacia D. Estos resultados se asemejan a los obtenidos por Tomazello Filho (1985), Ramos et al. (2011), Pirralho et al. (2014), Baldin et al. (2017) para diferentes especies del género, donde concluyen que la longitud aumenta de médula a corteza; estos resultados concuerdan con los periodos de formación de la madera, donde los anillos más cercanos a la médula corresponden a la madera juvenil formada por el árbol en sus primeros años de vida, y que se caracteriza por tener fibras más cortas que la madera adulta que se produce más tarde y corresponde a los anillos más próximos a la corteza (Tsoumis 1991, García Esteban et al. 2003).



Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p < 0,05$ ). Círculos blancos indican valores atípicos.

Figura No. 13. Longitud total de las fibras ( $\mu\text{m}$ ) según la posición radial

Para la longitud también hubo diferencias significativas entre las alturas (Figura No. 14), siendo mayor a los 2 metros, variando entre 751 a 1354  $\mu\text{m}$  con un promedio de 1118  $\mu\text{m}$ , ( $s = 151$ ;  $\text{CV} = 13,5\%$ ), comparado a 1,30 metros, con un rango de 704 a 1345  $\mu\text{m}$  y promedio de 1058  $\mu\text{m}$  ( $s = 181$ ;  $\text{CV} = 17,1\%$ ). Estas observaciones coinciden con las de Nisgoski et al. (1998), donde la longitud aumentó desde 1,3 metros hasta llegar a un pico en el 25 % de la altura comercial; y con las de Bocage y Ulery (2005) que, si bien no encontraron grandes variaciones a lo largo del fuste, se dio un leve aumento desde 1,3 metros hasta el 50 % de la altura comercial; ambos estudios para *E. benthamii*.



Letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas (Tukey,  $p < 0,05$ ).

Figura No. 14. Longitud total de las fibras ( $\mu\text{m}$ ) según la altura

#### 4.3 COEFICIENTES DEL POTENCIAL DE USO PARA CELULOSA Y PAPEL

Los índices calculados a partir de las dimensiones de las fibras (Cuadro No. 9), brindan un diagnóstico del potencial de una especie para la producción de celulosa y papel (Baldin et al., 2017).

Cuadro No. 9. Coeficientes del potencial de uso de *E. smithii* para producción de celulosa y papel

Coefficiente	Resultado
FR	0,44
FP (%)	24,57
CFL (%)	55,25
IE	65,28
L/E	531
FF de Luce	0,53

Donde: FR es factor de Runkel, FP es fracción de pared, CFL es coeficiente de flexibilidad, IE es índice de entrelazamiento, L/E es relación entre largo de fibra y espesor de la pared celular, FF es Factor de forma de Luce.

El factor de Runkel obtenido es bajo en relación a los calculados para otras especies (Cuadro No. 5). De acuerdo con Barrichelo y Brito, citados por Baldin et al. (2017), el factor calculado indicaría fibras muy buenas para la producción de papel, ya

que se encuentra dentro del rango 0,25 – 0,50. La fracción de pared al igual que el factor de Runkel es baja, asociándose a fibras de paredes delgadas, lo que genera una menor rigidez y mayor contacto entre fibras, favoreciendo la resistencia a la tracción y al reventamiento, aunque afectando la resistencia al rasgado (Mantero et al., 2008).

Según Venâncio Wate (2018), el factor de forma de Luce hallado en el presente trabajo se encuentra dentro del rango deseable para la producción de pulpa (0,4 a 0,6). Este índice también se vincula con el espesor de la pared celular y la rigidez de la fibra (Pirralho et al., 2014), afectando la densidad final de la hoja de papel: paredes más espesas (por tanto, mayor FF de Luce) dan lugar a papeles más porosos y opacos con mejor calidad para la impresión, paredes más delgadas (menor FF de Luce) determinan papeles más densos con alta resistencia a la ruptura (Weidenhoeft y Miller, citados por Baldin et al., 2017).

El coeficiente de flexibilidad se refiere a la facilidad de unión entre las fibras (Baldin et al., 2017); el valor encontrado en este estudio clasifica a las fibras como flexibles, que al entrelazarse tienden a formar papeles altamente resistentes (Bektas et al., citados por Baldin et al., 2017).

El índice de entrelazamiento (IE) es superior al de varias especies mencionadas previamente (Cuadro No. 5), presentando un valor medio-alto que indica fibras bastante más largas que anchas. A su vez, la relación L/E es alta, y al igual que el IE se asocia a la longitud de las fibras, aumentando la superficie de contacto y favoreciendo la unión entre ellas (Baldin et al., 2017). Ambos coeficientes se correlacionan positivamente con la resistencia a la tracción y al rasgado (Mantero et al. 2008, Pirralho et al. 2014, Baldin et al. 2017).

En cuanto a la especie en cuestión, no se encontró literatura que presentara índices de potencial de uso para celulosa y papel; y si bien se hizo referencia a los antecedentes para otros *Eucalyptus* resumidos en el Cuadro No. 5, las edades más jóvenes de los árboles en esos estudios solamente permiten una comparación ilustrativa con los del presente trabajo.

Los coeficientes obtenidos indicarían fibras que tienden a formar papeles con alta resistencia a la tracción, reventamiento y rasgado; por lo que se puede decir que *E. smithii* de 11 años de edad plantado en Uruguay tiene potencial para la producción de celulosa y papel.

## 5. CONCLUSIONES

*E. smithii* presentó una densidad básica alta, con un valor promedio de 0,66 g/cm<sup>3</sup>. Se evidenció una variación de la DApB en función de la altura y de la posición radial: a 1,30 metros fue mayor respecto a los 2 metros, y se observó un aumento al alejarse de la médula.

Los poros fueron descriptos como visibles a ojo desnudo, en su mayoría solitarios, de contorno redondeado, en arreglo diagonal, con porosidad difusa; diámetro tangencial del lumen promedio de 119  $\mu\text{m}$ , frecuencia promedio de 8 poros/mm<sup>2</sup>; elementos del vaso con o sin apéndices, con placas de perforación simples y longitud promedio de 323  $\mu\text{m}$ . El diámetro del lumen del vaso y la longitud de los elementos vasculares presentaron un aumento en sentido radial.

Se encontraron radios débilmente heterogéneos, uniseriados, con altura promedio de 229  $\mu\text{m}$  y 14 células, y frecuencia promedio de 13 radios/mm. No se encontraron variaciones para las características de los radios con la altura y la posición radial.

Se observaron fibras libriformes, de extremos ahusados, con espesor de pared promedio de 2  $\mu\text{m}$ , diámetro del lumen promedio de 9  $\mu\text{m}$ , ancho total promedio de 17  $\mu\text{m}$  y longitud promedio de 1088  $\mu\text{m}$ . La variación horizontal del espesor de pared, el ancho y la longitud de las fibras varió de manera igual, aumentando hacia la corteza. La longitud también varió con la altura, siendo mayor a los 2 metros respecto a 1,30 metros.

Los resultados para los coeficientes del potencial de uso para celulosa y papel fueron los siguientes: FR = 0,44; FP = 24,57; CFL = 55,25; IE = 65,28; L/E = 531 y FF de Luce = 0,53. Estos valores posicionan a *E. smithii* como una especie con aptitud para ser usada en la producción de celulosa y papel.

## 6. RESUMEN

*E. smithii* es una especie aun poco difundida en el país, que ha mostrado excelentes crecimientos en plantaciones del Sudeste. El presente trabajo tuvo como objetivo general evaluar las características anatómicas y densidad de la madera, y relacionarlas con las propiedades de pulpa y papel deseables en árboles de 11 años de edad, plantados en el departamento de Rocha, Uruguay. El material estudiado fue extraído de diez individuos seleccionados de acuerdo a buenas condiciones sanitarias, rectitud de fuste, buena formación de copa, sin árboles deprimidos cercanos, DAP normales, y densidad básica estimada. Se obtuvieron dos discos por árbol, a dos alturas: 1,30 metros y 2 metros; en cada una se estudiaron los elementos celulares y se determinó la densidad aparente básica basada en la norma TAPPI T258 om-02. Las variables medidas fueron: espesor de pared y diámetro del lumen de las fibras; diámetro tangencial del lumen del vaso, número de poros por mm<sup>2</sup>; número de radios por mm lineal, altura de radios en micras y en número de células, para dos posiciones radiales (B y D); densidad básica; longitud de los elementos del vaso; longitud y ancho de fibras, para cuatro posiciones radiales (A, B, C y D). A partir de las dimensiones fundamentales de las fibras, se calcularon coeficientes del potencial de uso para celulosa y papel. La densidad aparente básica fue alta, con un valor promedio de 0,66 g/cm<sup>3</sup>, mostrando una tendencia de aumento en sentido médula-corteza, y el promedio fue mayor a 1,30 metros de altura respecto al obtenido a 2 metros. El diámetro del lumen del vaso, la longitud de los elementos vasculares, el espesor de la pared de las fibras, el ancho total y la longitud de las fibras, evidenciaron la misma variación: aumento en sentido radial. A su vez, la longitud de las fibras también aumentó significativamente con la altura, siendo ésta mayor al medirla a 2 metros. Los resultados obtenidos para los coeficientes del potencial de uso permitieron suponer que los papeles producidos con *E. smithii* de 11 años de edad, plantados en el Este de Uruguay, tendrían un nivel de calidad aceptable respecto a su resistencia a la tracción, reventamiento y rasgado.

Palabras clave: *Eucalyptus smithii*; Características anatómicas; Densidad de la madera; Coeficientes del potencial de uso.

## 7. SUMMARY

*E. smithii* is a species that is not yet widespread in the country, which has shown excellent growth in plantations in the Southeast. The general objective of this study was to evaluate the anatomical characteristics and density of the wood and relate them to the desirable properties of pulp and paper in 11-year-old trees, planted in the department of Rocha, Uruguay. The studied material was extracted from ten individuals, selected according to good sanitary conditions, stem straightness, good crown formation, no nearby depressed trees, normal DBH, and estimated basic density. Two discs per tree were obtained, at two heights: 1.30 meters and 2 meters; in each one, the cellular elements were studied, and the basic bulk density was determined based on the TAPPI T258 om-02 standard. The measured variables were: wall thickness and diameter of the fiber lumen; the tangential diameter of the vessel lumen; height of rays in microns; number of pores per mm<sup>2</sup>; number of rays per linear mm and height of rays in number of cells, for two radial positions (B and D); density, length and width of fibers; and length of vessel elements, for four radial positions (A, B, C, and D). From the fundamental dimensions of the fibers, the potential use coefficients for cellulose and paper were calculated. The basic apparent density was high, with an average value of 0.66 g/cm<sup>3</sup>, showing an increasing trend in the medulla-cortex direction, and the average obtained at 1.30 meters height was higher than the one obtained at 2 meters height. The diameter of the vessel lumen, the length of the vascular elements, the thickness of the fiber wall, and the total width and length of the fibers showed the same variation: an increase in the radial direction. In turn, the length of the fibers also increased significantly with height, being higher when measured at 2 meters. The results obtained for the potential use coefficients allowed us to assume that the papers produced with 11-year-old *E. smithii*, planted in eastern Uruguay, would have an acceptable quality level with respect to their resistance to traction, bursting and tearing.

Keywords: *Eucalyptus smithii*; Anatomical characteristics; Density of the wood; Potential use coefficients.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Baldin, T.; Newton Cardoso Marchiori, J.; Nisgoski, S.; Talgatti, M.; Denardi, L. 2017. Anatomia da madeira e potencial de produção de celulose e papel de quatro espécies jovens de *Eucalyptus* L'Hér. *Ciência da Madeira*. 8(2):114-126.
2. Bocage Norman, I.; Ulery Duarte, L. A. 2005. Caracterización anatómica de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage cultivado en Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 67 p.
3. Boland, D. J.; Brooker, M. I. H.; Chippendale, G. M.; Hall, N.; Hyland, B. P. M.; Johnston, R. D.; Kleinig, D. A.; McDonald, M. W.; Turner, J. D. 2006. *Forest trees of Australia*. 5<sup>th</sup>. ed. Collingwood, CSIRO. 736 p.
4. Brussa, C. A. 1994. *Eucalyptus*: especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado. Montevideo, Hemisferio Sur. 328 p.
5. Cardoso, A.; Cagno, M.; Cárdenas, P.; Gatto, F. 2013. Contracción, hinchamiento y peso específico aparente de madera de *Eucalyptus colorado* (*Eucalyptus tereticornis* Smith). *INNOTEC*. no. 8:5-12.
6. Carrillo-Varela, I.; Teixeira Mendonça, R.; Ago, M.; Rojas, O. J. 2018. Comparative study of cellulosic components isolated from different *Eucalyptus* species. *Cellulose*. no. 25:1011-1029.
7. \_\_\_\_\_.; Valenzuela, P.; Gacitúa, W.; Texeira Mendonça, R. 2019. An evaluation of fiber biometry and nanomechanical properties of different *Eucalyptus* species. *BioResources*. 14(3):6433-6446.
8. Coronel, E. O. 1994. Peso específico de la madera. In: Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de la madera: fundamentos de las propiedades físicas de la madera. Santiago del Estero, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Facultad de Ciencias Forestales. pp. 43-66.
9. Dadswell, H. E. 1972. *The anatomy of Eucalypt woods*. Melbourne, CSIRO. 39 p.
10. Doldán, J.; Fariña, I.; Tarigo, F. 2008. Utilización de *Eucalyptus* spp. alternativas de plantaciones uruguayas para pulpa Kraft. *INNOTEC*. no. 3:30-34.

11. Downes, G. M.; Hudson, I. L.; Raymond, C. A.; Dean, G. H.; Michell, A. J.; Schimleck, L. R.; Evans, R.; Muneri, A. 1997. Sampling plantation Eucalypts for wood and fibre properties. Collingwood, CSIRO. 144 p.
12. Fabrowski, F. J.; Bolzon de Muñiz, G. I.; Nakashima, T.; Nisgoski, S.; Klock, U. 2003. Investigación da presença de óleo essencial em *Eucalyptus smithii* R.T. Baker por meio da anatomía de seu lenho e casca. *Ciência Florestal*. 13(1):95-106.
13. Fernández Caram, V.; Ros Castro, A. 2002. Caracterización anatómica de dos especies de *Eucalyptus*: *Eucalyptus dunnii* Maiden y *Eucalyptus badjensis* Beuzev & Welch. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 115 p.
14. García Esteban, L.; Guindeo Casasús, A.; Peraza Oramas, C.; de Palacios de Palacios, P. 2003. La madera: anomalías y defectos. *In*: La madera y su anatomía: anomalías y defectos, estructura microscópica de coníferas y frondosas, identificación de maderas, descripción de especies y pared celular. Madrid, Mundi-Prensa. pp. 15-48.
15. González Vilche, M. 2017. Caracterización del crecimiento de *Eucalyptus smithii* en Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 50 p.
16. Hillis, W. E. 1978. Wood quality and utilization. *In*: Hillis, W. E.; Brown, A. G. eds. *Eucalyptus for wood production*. Melbourne, CSIRO. pp. 259-289.
17. IAWA (International Association of Wood Anatomists, NL). 1989. List of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin*. 10(3):219-332.
18. Igartúa, D.; Monteoliva, S. 2010. Densidad básica, longitud de fibras y crecimiento en dos procedencias de *Eucalyptus globulus* en Argentina. *Bosque*. 31(2):150-156.
19. Jelvez, C. E. 2009. Variación de la estructura anatómica de la madera de *Eucalyptus globulus* de médula a corteza. Tesis Ing. en Maderas. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 33 p.
20. Krall, J. 1970. Fundamentos para nuevas introducciones de *Eucalyptus* en el Uruguay. Facultad de Agronomía. Boletín no. 113. 22 p.

21. Kruchelski, S.; William Trautenmüller, J. W.; Deiss, L.; Trevisan, R.; Cubbage, F.; Porfírio-da-Silva, V.; de Moraes, A. 2021. *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage growth and wood density in integrated crop-livestock systems. *Agroforestry Systems*. 95(8):1577-1588.
22. León Hernández, W. J.; Espinoza de Pernía, N. 2001. Anatomía de la madera. Mérida, Universidad de los Andes. 512 p.
23. LPF (Laboratório de Produtor Florestais, BR). 1991. Normas de procedimentos em estudos de anatomía da madeira: I. Angiospermae II. Gimnospermae. Brasília. 19 p.
24. Mantero, C.; Fernández, V.; Ros, A. 2008. Anatomía, peso específico aparente de la madera y porcentaje de corteza en orígenes de dos especies de *Eucalyptus* cultivadas en Uruguay (*Eucalyptus dunnii* Maiden y *Eucalyptus badjensis* Beuzev. & Welch). *Agrociencia* (Uruguay). 12(1):20-30.
25. Mendoza Lluberas, S.; Rava Giovio, A. 2009. Estudio de la variación del plan leñoso de la madera de híbridos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden y *Eucalyptus globulus* Labillardiere ssp. *globulus*. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 119 p.
26. MAP. DGRN (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección General de Recursos Naturales, UY). 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo. Esc. 1:1000000.
27. MGAP. DGF (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General Forestal, UY). 2021. Cartografía forestal nacional. Montevideo. 12 p.
28. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2022. Estadísticas forestales 2022: extracción – producción – consumo - mano de obra - comercio exterior. Montevideo. 70 p.
29. \_\_\_\_\_. DGRN (Ministerios de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General de Recursos Naturales, UY). 1996. Índices de productividad de suelos, grupos CONEAT. Montevideo. 62 p.
30. Moglia, J. G.; Bravo, S.; Gerez, R. 2008. Anatomía comparada del leño de *Eucalyptus camaldulensis* (Myrtaceae) de dos orígenes, ensayados en Santiago del Estero. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*. 43(3-4):239-246.

31. Moreno, K.; Igartúa, D. 2015. *Eucalyptus globulus* en el Sudeste de la provincia de Buenos Aires: edades, procedencias y densidad de la madera. RIA. 41(2):143-148.
32. Nisgoski, S.; de Muñiz, G. I. B.; Klock, U. 1998. Caracterização anatômica da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. Ciência Florestal. 8(1):67-76.
33. Omonte, M.; Valenzuela, L. 2011. Variación radial y longitudinal de la densidad básica en árboles de *Eucalyptus regnans* de 16 años. Ciencia y Tecnología. 13(2):211-224.
34. Paseyro, J. 2015. Más vale especie conocida que otra por conocer. (en línea). Revista Forestal. no. 11:16-22. Consultado 10 oct. 2020. Disponible en <http://www.revistaforestal.uy/silvicultura/mas-vale-especie-conocida-que-otra-por-conocer.html>
35. Pirralho, M.; Flores, D.; Sousa, V. B.; Quilhó, T.; Knapic, S.; Pereira, H. 2014. Evaluation on paper making potential of nine Eucalyptus species based on wood anatomical features. Industrial Crops and Products. 54:327-334.
36. R Core Team. 2019. R: a language and environment for statistical computing. (en línea). Vienna, Austria. s.p. Consultado mar. 2022. Disponible en <https://www.R-project.org/>
37. Ramos, L. M. A.; Latorraca, J. V.; Pastro, M. S.; Souza, M. T.; Garcia, R. A.; Carvalho, A. M. 2011. Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. Scientia Forestalis. 39(92):411-418.
38. TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, US). 2006. Basic density and moisture content of pulp wood. T258 om-02. Atlanta. 22 p.
39. Tomazello Filho, M. 1985. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* E *E. grandis*. IPEF. no. 29:37-45.
40. Toval, G. 2010. Calidad de la madera de *Eucalyptus globulus* como materia prima para la industria pastero-papelera. CIDEU. no. 8-9:5-14.

41. Tsoumis, G. 1991. Density and specific gravity. In: Science and technology of wood: structure, properties, utilization. New York, Chapman and Hill. pp. 111-127.
42. Tuset, R.; Durán, F. 2008. Estructura y propiedades de la madera. In: Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. Montevideo, Hemisferio Sur. v. 2, pp. 1-98.
43. Venâncio Wate, P. 2018. Avaliação da aptidão morfológica das fibras de cinco espécies do genero *Eucalyptus* na produção de polpa para papel. Tesis Mtr. Tecnologia e Utilização da Madeira. Maputo, Mozambique. Universidade Eduardo Mondlane. Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal. 64 p.
44. Villegas, M. S.; Rivera, S. M. 2002. Revisión xilológica de las principales especies del género *Eucalyptus* L'Herit. cultivadas en Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía (La Plata). 105(1):9-28.
45. Williams, J.; León, H. 2010. Anatomía y densidad o peso específico de la madera. Revista Forestal Venezolana. 54(1):67-76.

9. ANEXOS

Anexo No. 1. Variables cuantitativas de 2 posiciones para fibras y vasos

ID	Altura	Posición	Esp.pared fibras	Diám.lumen fibras	Diám.lumen vasos	Poros/mm <sup>2</sup>
1	DAP	B	1,706	8,925	92,695	10
2	DAP	B	1,736	10,485	125,166	8
3	DAP	B	1,709	11,426	119,827	7
4	DAP	B	1,921	10,905	107,391	8
5	DAP	B	1,173	11,005	109,231	9
6	DAP	B	1,725	7,104	109,488	6
7	DAP	B	1,137	10,771	109,111	7
8	DAP	B	1,758	9,206	98,966	11
9	DAP	B	1,811	9,247	115,424	8
10	DAP	B	1,844	10,630	121,764	11
1	API	B	1,461	8,279	100,217	11
2	API	B	2,280	8,620	115,528	11
3	API	B	1,960	9,433	120,854	7
4	API	B	1,801	12,358	133,850	5
5	API	B	1,225	10,981	103,442	9
6	API	B	2,312	8,228	108,050	7
7	API	B	2,168	8,382	112,424	11
8	API	B	1,660	8,929	105,898	11
9	API	B	1,952	9,287	127,016	8
10	API	B	1,663	8,670	115,341	13
1	DAP	D	1,979	7,443	99,697	10
2	DAP	D	2,525	10,091	120,191	8
3	DAP	D	1,742	12,347	125,169	6
4	DAP	D	1,721	12,203	118,266	8
5	DAP	D	2,370	9,190	99,997	6
6	DAP	D	2,427	7,111	131,973	6
7	DAP	D	2,525	7,173	117,049	6
8	DAP	D	2,533	9,542	138,635	9
9	DAP	D	2,040	9,340	134,661	9
10	DAP	D	2,134	8,047	117,878	9
1	API	D	2,778	7,267	133,208	9
2	API	D	2,067	11,325	144,238	8
3	API	D	2,471	9,562	130,256	8
4	API	D	1,864	6,458	123,989	7
5	API	D	1,819	9,614	138,952	7

6	API	D	3,219	7,753	128,003	9
7	API	D	2,478	7,232	122,698	6
8	API	D	1,905	9,970	128,660	7
9	API	D	2,870	6,957	119,306	8
10	API	D	3,416	6,817	138,713	7

Anexo No. 2. Variables cuantitativas de 2 posiciones para radios parenquimáticos

ID	Altura	Posición	Altura en micras	Altura en no. células	Radios/mm
1	DAP	B	219,598	15	13
2	DAP	B	204,384	13	13
3	DAP	B	249,025	16	14
4	DAP	B	240,403	13	14
5	DAP	B	263,481	16	14
6	DAP	B	183,150	11	12
7	DAP	B	237,994	15	15
8	DAP	B	212,011	14	13
9	DAP	B	235,673	16	13
10	DAP	B	222,787	15	13
1	API	B	197,096	12	12
2	API	B	211,896	15	15
3	API	B	223,558	15	11
4	API	B	190,312	11	12
5	API	B	226,840	15	13
6	API	B	182,162	11	11
7	API	B	277,198	16	12
8	API	B	223,472	13	14
9	API	B	180,953	13	10
10	API	B	247,373	17	13
1	DAP	D	189,900	11	12
2	DAP	D	199,422	12	15
3	DAP	D	253,915	14	12
4	DAP	D	219,581	11	12
5	DAP	D	207,712	12	15
6	DAP	D	240,551	13	13
7	DAP	D	265,827	14	13
8	DAP	D	230,368	13	13
9	DAP	D	192,188	12	13
10	DAP	D	298,386	19	13
1	API	D	219,504	11	12

2	API	D	209,883	13	12
3	API	D	277,488	15	12
4	API	D	217,030	12	12
5	API	D	273,644	15	12
6	API	D	119,567	15	12
7	API	D	313,087	16	13
8	API	D	275,429	15	14
9	API	D	234,183	15	13
10	API	D	294,790	17	14

Anexo No. 3. Variables cuantitativas de 4 posiciones

ID	Altura	Posición	DAPB	Long. fibras	Ancho fibras	Long. elementos vasculares
1	DAP	A	0,671	946,755	16,384	270,732
2	DAP	A	0,620	733,298	17,081	219,216
3	DAP	A	0,595	716,569	15,028	184,965
4	DAP	A	0,613	704,551	15,440	200,816
5	DAP	A	0,637	879,226	18,098	310,106
6	DAP	A	0,659	803,065	15,963	240,210
7	DAP	A	0,617	951,683	15,699	345,471
8	DAP	A	0,660	924,955	17,419	228,571
9	DAP	A	0,663	728,242	18,242	222,918
10	DAP	A	0,619	819,465	17,952	245,853
1	API	A	0,654	941,818	13,773	261,824
2	API	A	0,615	1010,541	15,187	253,658
3	API	A	0,625	1027,617	15,186	277,700
4	API	A	0,595	888,795	17,236	295,327
5	API	A	0,615	751,460	14,886	267,736
6	API	A	0,614	785,797	18,458	241,447
7	API	A	0,574	959,718	15,044	260,207
8	API	A	0,632	1062,752	14,857	296,852
9	API	A	0,575	939,271	15,812	300,067
10	API	A	0,620	979,465	17,171	332,021
1	DAP	B	0,656	1111,190	16,877	277,490
2	DAP	B	0,695	1176,697	15,534	330,589
3	DAP	B	0,661	1051,596	14,501	272,789
4	DAP	B	0,649	997,538	15,960	296,596
5	DAP	B	0,710	903,298	14,894	334,944
6	DAP	B	0,688	1345,225	16,882	323,825

7	DAP	B	0,634	929,575	15,267	281,324
8	DAP	B	0,707	967,502	17,516	257,978
9	DAP	B	0,605	872,108	19,575	355,689
10	DAP	B	0,687	1051,200	16,423	333,841
1	API	B	0,679	1117,994	15,559	342,855
2	API	B	0,623	1081,941	14,856	282,920
3	API	B	0,652	1190,775	17,197	349,260
4	API	B	0,621	957,431	17,281	273,195
5	API	B	0,673	959,877	18,482	318,454
6	API	B	0,636	1074,407	17,227	331,016
7	API	B	0,637	1012,415	16,133	286,432
8	API	B	0,671	1074,054	13,855	277,101
9	API	B	0,556	1062,707	15,896	301,579
10	API	B	0,678	1092,044	19,021	353,495
1	DAP	C	0,713	1232,635	18,358	340,833
2	DAP	C	0,732	1276,363	16,269	317,611
3	DAP	C	0,667	1257,557	17,530	349,110
4	DAP	C	0,696	1128,346	16,750	331,596
5	DAP	C	0,731	1102,868	16,044	342,439
6	DAP	C	0,721	1103,516	16,426	322,145
7	DAP	C	0,751	1188,181	16,508	339,514
8	DAP	C	0,716	1201,744	13,403	332,252
9	DAP	C	0,703	1174,078	17,744	408,407
10	DAP	C	0,721	1087,530	15,949	360,230
1	API	C	0,698	1182,416	17,782	338,819
2	API	C	0,670	1206,086	16,055	348,928
3	API	C	0,648	1293,681	18,613	318,683
4	API	C	0,668	1262,358	17,481	364,235
5	API	C	0,696	1153,253	16,993	453,231
6	API	C	0,673	1254,658	18,385	421,107
7	API	C	0,698	1255,561	16,366	355,402
8	API	C	0,684	1328,675	15,768	363,325
9	API	C	0,695	1275,068	17,618	403,457
10	API	C	0,680	1144,880	17,687	384,079
1	DAP	D	0,699	1292,827	19,266	363,949
2	DAP	D	0,671	1196,197	15,663	303,990
3	DAP	D	0,627	1181,838	18,618	335,589
4	DAP	D	0,628	1143,941	16,840	322,595
5	DAP	D	0,665	1009,210	16,287	238,582
6	DAP	D	0,645	1076,515	16,523	307,439
7	DAP	D	0,644	1205,627	17,222	406,152

8	DAP	D	0,653	1289,015	16,914	360,254
9	DAP	D	0,660	1257,911	16,364	414,836
10	DAP	D	0,643	1285,841	16,977	386,103
1	API	D	0,700	1354,150	18,427	408,654
2	API	D	0,644	1264,470	17,076	318,474
3	API	D	0,646	1326,270	18,744	344,299
4	API	D	0,624	1184,362	14,940	416,215
5	API	D	0,635	1090,568	17,434	346,924
6	API	D	0,660	1256,265	16,763	425,621
7	API	D	0,663	1201,099	17,058	426,790
8	API	D	0,668	1345,516	17,718	407,925
9	API	D	0,661	1189,908	15,636	328,747
10	API	D	0,653	1186,756	17,110	384,283

#### Anexo No. 4. Script de RStudio para análisis de datos

```

#instalar librerias
install.packages("readxl")
install.packages("nlme")
install.packages("car")
install.packages("nortest")
install.packages("emmeans")
install.packages("multcomp")
install.packages("multcompView")
install.packages("lme4")
install.packages("carData")
install.packages("psych")

#leer librerias
library(readxl)
library(nlme)
library(car)
library(carData)
library(nortest)
library(emmeans)
library(multcomp)
library(multcompView)
library(lme4)
library(psych)

#leer datos
datos <- read_excel("C:/Users/marcia/Desktop/TESIS/Análisis de datos/Variables.xlsx")

```

```
View(datos)
```

```
datos2 <- read_excel("C:/Users/marcia/Desktop/TESIS/Análisis de  
datos/VARIABLES4P.xlsx")
```

```
View(datos2)
```

```
#declarar factores
```

```
a_factor <- c("ID")
```

```
datos[, a_factor] <- lapply(datos[,a_factor],factor)
```

```
datos2[, a_factor] <- lapply(datos2[,a_factor],factor)
```

```
b_factor <- c("Altura")
```

```
datos[, b_factor] <- lapply(datos[,b_factor],factor)
```

```
datos2[, b_factor] <- lapply(datos2[,b_factor],factor)
```

```
c_factor <- c("Posicion")
```

```
datos[, c_factor] <- lapply(datos[,c_factor],factor)
```

```
datos2[, c_factor] <- lapply(datos2[,c_factor],factor)
```

```
a_integer <- c("radiosmm")
```

```
datos[, a_integer] <- lapply(datos[,a_integer],as.integer)
```

```
b_integer <- c("altradcel")
```

```
datos[, b_integer] <- lapply(datos[,b_integer],as.integer)
```

```
c_integer <- c("porosmm2")
```

```
datos[, c_integer] <- lapply(datos[,c_integer],as.integer)
```

```
str(datos)
```

```
str(datos2)
```

```
#modelo para variables continuas
```

```
esppfibra <- lme(esppfibra~1+Altura+Posicion+Altura*Posicion, random =
```

```
list(ID=pdIdent(~1)), data = datos)
```

```
summary(esppfibra)
```

```
Anova(esppfibra, type = "3")
```

```
diamf <- lme(diamlfibra~1+Altura+Posicion+Altura*Posicion, random =
```

```
list(ID=pdIdent(~1)), data = datos)
```

```
summary(diamf)
```

```
Anova(diamf, type = "3")
```

```
diamlv <- lme(diamtglvaso~1+Altura+Posicion+Altura*Posicion, random =
```

```
list(ID=pdIdent(~1)), data = datos)
```

```
summary(diamlv)
```

```
Anova(diamlv, type = "3")
```

```
altrm <- lme(altradmicras~1+Altura+Posicion+Altura*Posicion, random =  
list(ID=pdIdent(~1)), weights=varComb(varIdent(form=~1|Altura)), data = datos)  
summary(altrm)  
Anova(altrm, type = "3")
```

```
dens <- lme(dapb~1+Altura+Posicion+Altura*Posicion, random = list(ID=pdIdent(~1)),  
data = datos2)  
summary(dens)  
Anova(dens, type = "3")
```

```
longf <- lme(longfibra~1+Altura+Posicion+Altura*Posicion, random =  
list(ID=pdIdent(~1)), weights=varComb(varIdent(form =~1|Altura)), data = datos2)  
summary(longf)  
Anova(longf, type = "3")
```

```
anchof <- lme(anchofibra~1+Altura+Posicion+Altura*Posicion, random =  
list(ID=pdIdent(~1)), data = datos2)  
summary(anchof)  
Anova(anchof, type = "3")
```

```
longv <- lme(longvaso~1+Altura+Posicion+Altura*Posicion, random =  
list(ID=pdIdent(~1)), data = datos2)  
summary(longv)  
Anova(longv, type = "3")
```

```
#test homogeneidad de varianza  
abs.esppfibra <- abs(residuals(esppfibra, type="pearson"))  
leveneTest(abs.esppfibra ~ datos$Posicion)  
leveneTest(abs.esppfibra ~ datos$Altura)  
leveneTest(abs.esppfibra ~ datos$Posicion*datos$Altura)
```

```
abs.diamf <- abs(residuals(diamf, type="pearson"))  
leveneTest(abs.diamf ~ datos$Posicion)  
leveneTest(abs.diamf ~ datos$Altura)  
leveneTest(abs.diamf ~ datos$Posicion*datos$Altura)
```

```
abs.diamlv <- abs(residuals(diamlv, type="pearson"))  
leveneTest(abs.diamlv ~ datos$Posicion)  
leveneTest(abs.diamlv ~ datos$Altura)  
leveneTest(abs.diamlv ~ datos$Posicion*datos$Altura)
```

```
abs.altrm <- abs(residuals(altrm, type="pearson"))  
leveneTest(abs.altrm ~ datos$Posicion)
```

```

leveneTest(abs.altrm ~ datos$Altura)
leveneTest(abs.altrm ~ datos$Posicion*datos$Altura)

abs.dens <- abs(residuals(dens, type="pearson"))
leveneTest(abs.dens ~ datos2$Posicion)
leveneTest(abs.dens ~ datos2$Altura)
leveneTest(abs.dens ~ datos2$Posicion*datos2$Altura)

abs.longf <- abs(residuals(longf, type="pearson"))
leveneTest(abs.longf ~ datos2$Posicion)
leveneTest(abs.longf ~ datos2$Altura)
leveneTest(abs.longf ~ datos2$Posicion*datos2$Altura)

abs.anchof <- abs(residuals(anchof, type="pearson"))
leveneTest(abs.anchof ~ datos2$Posicion)
leveneTest(abs.anchof ~ datos2$Altura)
leveneTest(abs.anchof ~ datos2$Posicion*datos2$Altura)

abs.longv <- abs(residuals(longv, type="pearson"))
leveneTest(abs.longv ~ datos2$Posicion)
leveneTest(abs.longv ~ datos2$Altura)
leveneTest(abs.longv ~ datos2$Posicion*datos2$Altura)

#test normalidad
res.esppfibra <- residuals(esppfibra,type="pearson")
ad.test(res.esppfibra)

res.diamf <- residuals(diamf,type="pearson")
ad.test(res.diamf)

res.diamlv <- residuals(diamlv,type="pearson")
ad.test(res.diamlv)

res.altrm <- residuals(altrm,type="pearson")
ad.test(res.altrm)

res.dens <- residuals(dens,type="pearson")
ad.test(res.dens)

res.longf <- residuals(longf,type="pearson")
ad.test(res.longf)

res.anchof <- residuals(anchof,type="pearson")

```

```
ad.test(res.anchof)
```

```
res.longv <- residuals(longv,type="pearson")  
ad.test(res.longv)
```

```
#test de medias (se hace solo las que son significativas) (se usa tanto para lme como para  
glmr)
```

```
pes <- emmeans(esppfibra, ~ Posicion)  
cld(pes, Letters=letters, type = "response", reversed = TRUE, adjust = "none")
```

```
pdiv <- emmeans(diamlv, ~ Posicion)  
cld(pdiv, Letters=letters, type = "response", reversed = TRUE, adjust = "none")
```

```
ad <- emmeans(dens, ~ Altura)  
cld(ad, Letters=letters, type = "response", reversed = TRUE, adjust = "none")  
pd <- emmeans(dens, ~ Posicion)  
cld(pd, Letters=letters, type = "response", reversed = TRUE, adjust = "none")
```

```
alf <- emmeans(longf, ~ Altura)  
cld(alf, Letters=letters, type = "response", reversed = TRUE, adjust = "none")  
plf <- emmeans(longf, ~ Posicion)  
cld(plf, Letters=letters, type = "response", reversed = TRUE, adjust = "none")
```

```
paf <- emmeans(anchof, ~ Posicion)  
cld(paf, Letters=letters, type = "response", reversed = TRUE, adjust = "none")
```

```
plv <- emmeans(longv, ~ Posicion)  
cld(plv, Letters=letters, type = "response", reversed = TRUE, adjust = "none")
```

```
#modelo para variables conteo (variables enteras)
```

```
poros <-  
glmer(porosmm2~1+Altura+Posicion+Altura*Posicion+(1|ID),family=poisson(link=log  
,nAGQ = 0,data=datos)  
summary(poros)  
Anova(poros,type = 3)
```

```
radios <-  
glmer(radiosmm~1+Altura+Posicion+Altura*Posicion+(1|ID),family=poisson(link=log)  
,nAGQ = 0,data=datos)  
summary(radios)  
Anova(radios,type = 3)
```

```
altradio <-  
glmer(altradcel~1+Altura+Posicion+Altura*Posicion+(1|ID),family=poisson(link=log),n  
AGQ = 0,data=datos)  
summary(altradio)  
Anova(altradio,type = 3)
```

```
#indicadores estadísticos básicos generales
```

```
describe(datos$esppfibra)  
describe(datos$diamlfibra)  
describe(datos$diamtglvaso)  
describe(datos$altradmicras)  
describe(datos$porosmm2)  
describe(datos$radiosmm)  
describe(datos$altradcel)
```

```
describe(datos2$dapb)  
describe(datos2$longfibra)  
describe(datos2$anchofibra)  
describe(datos2$longvaso)
```

```
#indicadores estadísticos básicos por grupo
```

```
d1A <- describe.by(datos,datos$Altura)  
d2A <- describe.by(datos2,datos2$Altura)
```

```
d1P <- describe.by(datos,datos$Posicion)  
d2P <- describe.by(datos2,datos2$Posicion)
```

```
d1A  
d2A  
d1P  
d2P
```

```
#gráfico de cajas para densidad
```

```
boxplot(dapb~Altura, ylab = 'DApB (g/cm3)', datos2,col=c("yellow","mediumorchid"))  
boxplot(dapb~Posicion, ylab = 'DApB (g/cm3)', xlab = 'Posición radial',  
datos2,col=c("aquamarine3","hotpink","chartreuse3","sienna1"))
```

```
#gráfico de cajas para diametro del vaso
```

```
boxplot(diamtglvaso~Posicion, ylab = 'Diámetro tg del lumen', xlab = 'Posición radial',  
datos,col=c("darkorange","blue3"))
```

```
#gráfico de cajas para long. elemento del vaso  
boxplot(longvaso~Posicion, ylab = 'Longitud del elemento del vaso', xlab = 'Posición  
radial', datos2,col=c("red", "green4", "darkorchid1", "gold"))
```

```
#gráfico de cajas para long. fibras  
boxplot(longfibra~Altura, ylab = 'Longitud de las fibras',  
datos2,col=c("darkgoldenrod3", "ivory3"))  
boxplot(longfibra~Posicion, ylab = 'Longitud de las fibras', xlab = 'Posición radial',  
datos2,col=c("orangered1", "darkslategray3", "deeppink1", "olivedrab3"))
```

```
#gráfico de cajas para espesor de pared de fibras  
boxplot(esppfibra~Posicion, ylab = 'Espesor de pared de las fibras', xlab = 'Posición  
radial', datos,col=c("firebrick1", "olivedrab3"))
```

```
#gráfico de cajas para ancho de fibras  
boxplot(anchofibra~Posicion, ylab = 'Ancho de fibras', xlab = 'Posición radial',  
datos2,col=c("yellow", "yellow3", "yellow4", "olivedrab4"))
```